

UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID
FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS
Departamento de Geodinámica



TESIS DOCTORAL

**Influencia de los patrones de laboreo sobre la respuesta
erosiva durante episodios extremos de erosión en paisajes
agrícolas de secano mediterráneo**

MEMORIA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR

PRESENTADA POR

Ivón Cermeño Martín

Director

Saturnino de Alba Alonso

Madrid, 2018



UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

FACULTAD DE CIENCIAS GEOLÓGICAS

Departamento de Geodinámica

Programa de doctorado “Geología e Ingeniería Geológica”

Influencia de los patrones de laboreo sobre la respuesta erosiva durante episodios extremos de erosión en paisajes agrícolas de secano mediterráneo

MEMORIA PRESENTADA PARA OPTAR AL GRADO DE DOCTOR POR:

IVÓN CERMEÑO MARTÍN

DIRIGIDA POR:

SATURNINO DE ALBA ALONSO

DEPARTAMENTO DE GEODINÁMICA, UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

MADRID, ABRIL DE 2017

*A quienes se fueron apeando en cada estación de este largo recorrido,
a quienes no lo hicieron,
y, aún mas, a quienes no dejaron que yo me apease.*

*Gure hitzak
esan berriz esan
ez daitezela ahaztu
ez daitezela gal,
elur gainean
txori anka arinek
utzitako arrasto sail
ederra bezalaxe.*

*Repitamos una y otra vez
nuestras palabras
que no se olviden
que no se pierdan,
como las bellas marcas
que los ligeros pies
de los pájaros
dejan sobre la nieve.*

Mikel Laboa

Agradecimientos

Me gustaría mostrar mi más sincero agradecimiento a todas y cada una de las personas que me han acompañado y apoyado en este largo camino y que directa o indirectamente me han ayudado y han hecho posible este trabajo.

A mi director, Saturnino de Alba Alonso, por su apoyo y por confiar en mí durante todo este tiempo. Gracias por contagiarme tu entusiasmo y compromiso personal hacia la investigación y por hacerme mirar los paisajes agrícolas con otros ojos.

A José Francisco Martín Duque, por animarme a iniciar esta aventura, por sus consejos, su confianza, su tiempo, su paciencia y su ayuda. En resumen, por estar siempre a bordo.

A Chiquinquirá Hontoria Fernández de la E.T.S.I. de Agrónomos de la Universidad Politécnica de Madrid y a M^a Carmen Lobo Bédmar del IMIDRA por su valiosa ayuda en la realización de los análisis de suelo.

A todas y cada una de las personas que me acompañaron y ayudaron en algún momento en las campañas de campo, a veces satisfactorias, a veces largas, frías y duras. Contra viento y marea conseguimos llevarlas adelante y nunca lo podría haber hecho solo. Fuisteis tantas que sería difícil no olvidarme de algún nombre, así que un gracias compartido.

A todos mis compañeros del Departamento de Geodinámica de la Facultad de Geología de la Universidad Complutense de Madrid por su amistad y apoyo. En especial, quiero dar las gracias a Cris, María, Sara, Ana, Nacho y Néstor, por escucharme, comprenderme y estar siempre dispuestos a ayudar con una sonrisa. Mención especial a Edu, porque dar tanto en tan poco tiempo y, como no, a María, por tantas horas de campo, coche y despacho, por darme ánimos en los malos momentos y confiar siempre en mí. Ha sido una suerte compartir contigo este camino. Sabes que sin ti no habría sido posible.

A mi familia y amigos por estar siempre ahí. Vuestro cariño y apoyo ha sido fundamental y os pido perdón si en algún momento no os he podido dedicar el tiempo que merecáis. Especialmente a mis padres y a mi hermana, por enseñarme que la perseverancia y el esfuerzo son el camino para lograr los objetivos y por confiar en mí de manera incondicional. Vosotros me hacéis sentir que soy capaz de conseguir cualquier cosa. A Nerea, por estar siempre a mi lado, por su comprensión y paciencia infinita. Nunca hubiera llegado hasta aquí sin ti.

Por último, señalar que la realización de esta Tesis ha sido posible gracias a la financiación de diversos proyectos de investigación por el Servicio de Investigación Agraria de la Consejería de Agricultura de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha (1992-97; 1999-2002; 2003-2006; 2008-2011); la Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y la Desertificación (RESEL) del Proyecto LUCDEME del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (1995-2011); el proyecto “Influencia de los sistemas de manejo agrícola sobre la degradación del suelo por erosión. Efectos erosivos de los episodios extremos (MANERO)”, MEC AGL-2004-00650 (2004-2007) y, como no, a la beca predoctoral para la formación de investigadores (ref. BFIO7.331) del Departamento de Educación, Universidades e Investigación del Gobierno Vasco- Eusko Jaurlaritza.

INDICE ABREVIADO

1. RESUMEN Y ABSTRACT.....	1
2. INTRODUCCIÓN	7
2.1. Degradación del suelo por erosión	9
2.2. Erosión hídrica en campos agrícolas	12
2.3. Erosión por flujos concentrados	15
2.4. Erosión hídrica en España	17
2.5. El estudio de la erosión en España	19
2.6. Importancia de los eventos de precipitación extrema sobre la erosión del suelo	20
2.7. La Política Agraria Común (PAC) y la conservación del suelo: el barbecho blanco y el laboreo en contorno	22
2.8. Objetivos	28
3. ÁREA DE ESTUDIO.....	31
3.1. Introducción.....	33
3.2. Localizaciones dentro de la Comunidad de Madrid.....	33
3.3. Comarca de La Mancha-Campo de Montiel	42
3.4. Comarca de Torrijos.....	51
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	57
4.1. Introducción.....	59
4.2. Procedimiento para la medición de la erosión por regueros y/o cárcavas efímeras	60
4.3. Determinación de las propiedades físicas y químicas de los suelos de estudio	69
4.4. Caracterización de la precipitación desencadenante de los episodios de erosión y análisis de frecuencia	71
5. CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE EPISODIOS EROSIVOS SOBRE SUELOS AGRÍCOLAS DE LA ZONA CENTRAL DE ESPAÑA	73
5.1. Introducción.....	75
5.2. Caracterización y cuantificación de los episodios erosivos	76
5.3. Discusión de los resultados obtenidos en los episodios erosivos.....	170
5.4. Conclusiones	182
6. PRECISIÓN Y EFICIENCIA DE DIFERENTES PROPUESTAS METODOLÓGICAS PARA LA MEDICIÓN EN CAMPO DE LA EROSIÓN POR REGUEROS Y/O CÁRCAVAS EFÍMERAS	185
6.1. Introducción y objetivos	187
6.2. Software Rill Morphometer	191
6.3. Métodos alternativos propuestos	192

6.4. Determinación de la precisión y del potencial ahorro temporal de los métodos alternativos propuestos	196
6.5. Obtención de las longitudes de las redes de regueros	217
6.6. Resultados finales	222
6.7. Procedimiento para la selección previa del método óptimo de toma de datos en campo en cada circunstancia	223
6.8. Futuras líneas de investigación: aplicación de la fotogrametría moderna (Structure from Motion, SfM) y uso de drones.....	227
6.9. Conclusiones	228
7. INFLUENCIA DE LA TOPOGRAFÍA Y LA RUGOSIDAD ORIENTADA EN LA EROSIÓN POR REGUEROS Y CÁRCAVAS EFÍMERAS	231
7.1. Introducción.....	233
7.2. Procesos erosivos de vaguada: relaciones de la pendiente y la superficie de la cuenca de drenaje con las secciones de las cárcavas efímeras	234
7.3. Procesos erosivos de ladera: relaciones de la pendiente y la superficie de la cuenca de drenaje con las secciones de los regueros.....	240
7.4. Síntesis de los resultados	252
7.5. Influencia de la rugosidad orientada sobre las morfologías de las redes de regueros y las tasas de erosión en los procesos erosivos de ladera	254
7.6. Conclusiones	296
8. ANÁLISIS DEL LABOREO EN CONTORNO COMO ESTRATEGIA PARA LA CONSERVACIÓN DEL SUELO	299
8.1. Introducción.....	301
8.2. El desarrollo de la USLE y, posteriormente, de la RUSLE	302
8.3. Valores del factor P para el laboreo en contorno.....	310
8.4. Contradicción entre los postulados del factor P de la USLE/RUSLE y los resultados obtenidos en este estudio	314
8.5. Conclusiones	324
9. CONCLUSIONES.....	325
10.BIBLIOGRAFÍA.....	331
11.ANEXOS.....	355

INDICE EXTENDIDO

1. RESUMEN Y ABSTRACT.....	1
2. INTRODUCCIÓN	7
2.1. Degradación del suelo por erosión	9
2.2. Erosión hídrica en campos agrícolas	12
2.3. Erosión por flujos concentrados	15
2.4. Erosión hídrica en España	17
2.5. El estudio de la erosión en España	19
2.6. Importancia de los eventos de precipitación extrema sobre la erosión del suelo	20
2.7. La Política Agraria Común (PAC) y la conservación del suelo: el barbecho blanco y el laboreo en contorno	22
2.7.1. El barbecho blanco, una práctica habitual en la agricultura extensiva de secano en España apuntalada por la legislación.....	25
2.7.2. El laboreo en contorno como estrategia para la conservación del suelo.....	27
2.8. Objetivos	28
3. ÁREA DE ESTUDIO.....	31
3.1. Introducción.....	33
3.2. Localizaciones dentro de la Comunidad de Madrid.....	33
3.2.1. Marco fisiográfico y geológico	33
3.2.2. Climatología y vegetación.....	37
3.2.3. Edafología y usos del suelo	40
3.3. Comarca de La Mancha-Campo de Montiel	42
3.3.1. Marco fisiográfico y geológico	42
3.3.2. Climatología y vegetación.....	46
3.3.3. Edafología y usos del suelo.....	48
3.4. Comarca de Torrijos	51
3.4.1. Marco fisiográfico y geológico	51
3.4.2. Climatología y vegetación.....	53
3.4.3. Edafología y usos del suelo	54
4. MATERIALES Y MÉTODOS.....	57
4.1. Introducción.....	59
4.2. Procedimiento para la medición de la erosión por regueros y/o cárcavas efímeras	60
4.2.1. Levantamiento topográfico de detalle de la ladera afectada por los sistemas de regueros y/o cárcavas y delimitación de las microcuencas de drenaje	62
4.2.2. Cartografía de las redes de regueros y/o cárcavas efímeras.....	63

4.2.2.1. Distribución de las secciones transversales sobre las redes dendríticas de regueros.....	65
4.2.2.2. Distribución de las secciones transversales sobre las redes de regueros confinados	66
4.2.3. Cuantificación del volumen de suelo perdido	67
4.3. Determinación de las propiedades físicas y químicas de los suelos de estudio	69
4.3.1. Métodos de análisis de las propiedades físicas del suelo.....	69
4.3.1.1. Descripción morfológica y clasificación de los perfiles del suelo	69
4.3.1.2. Análisis granulométrico y textural.....	70
4.3.1.3. Densidad aparente	70
4.3.2. Métodos de análisis de las propiedades químicas del suelo	70
4.3.2.1. pH y conductividad eléctrica	70
4.3.2.2. Materia orgánica.....	70
4.3.2.3. Carbonatos totales.....	70
4.3.2.4. Cationes de cambio y capacidad de intercambio catiónico	70
4.4. Caracterización de la precipitación desencadenante de los episodios de erosión y análisis de frecuencia.....	71
5. CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN DE EPISODIOS EROSIVOS SOBRE SUELOS AGRÍCOLAS DE LA ZONA CENTRAL DE ESPAÑA	73
5.1 Introducción.....	75
5.2 Caracterización y cuantificación de los episodios erosivos	76
5.2.1. Episodio erosivo en Arroyomolinos, Madrid	76
5.2.1.1. Descripción del área de estudio	76
5.2.1.1.1. Marco fisiográfico.....	76
5.2.1.1.2. Edafología y usos del suelo.....	77
5.2.1.1.3. Caracterización de las laderas de estudio	81
5.2.1.2. Caracterización de la precipitación desencadenante de la erosión del suelo.....	83
5.2.1.3. Resultados	86
5.2.1.3.1. Arroyomolinos campo 1 (Ay-1)	86
5.2.1.3.2. Arroyomolinos campo 2 (Ay-2)	93
5.2.2. Episodio erosivo en Villarrubia de los Ojos, Ciudad Real.....	101
5.2.2.1. Descripción del área de estudio	101
5.2.2.1.1. Marco fisiográfico.....	101
5.2.2.1.2. Edafología y usos del suelo.....	102
5.2.2.1.3. Caracterización de las laderas de estudio	105
5.2.2.2. Caracterización de la precipitación desencadenante de la erosión del suelo.....	107
5.2.2.3. Resultados	110
5.2.2.3.1. Villarrubia de los Ojos campo 1 (Vo-1).....	110
5.2.2.3.2. Villarrubia de los Ojos campos 2 y 3 (Vo-2 y Vo-3)	114
5.2.3. Episodio erosivo en Paracuellos del Jarama y Ajalvir, Comunidad de Madrid	117
5.2.3.1. Descripción del área de estudio	117
5.2.3.1.1. Marco fisiográfico.....	117
5.2.3.1.2. Edafología y usos del suelo.....	119
5.2.3.1.3. Caracterización de las laderas de estudio	124
5.2.3.2. Caracterización de la precipitación desencadenante de la erosión del suelo.....	127
5.2.3.3. Resultados	131

5.2.3.3.1. Paracuellos del Jarama	131
5.2.3.3.2. Ajalvir campos 1 y 2 (Aj-1 y Aj-2)	136
5.2.4. Episodios erosivos en Móstoles, Comunidad de Madrid	142
5.2.4.1. Descripción del área de estudio	142
5.2.4.1.1. Marco fisiográfico	142
5.2.4.1.2. Edafología y usos del suelo	144
5.2.4.1.3. Caracterización de las laderas de estudio	146
5.2.4.2. Caracterización de las precipitaciones desencadenantes de la erosión del suelo	148
5.2.4.2.1. Evento de precipitación desencadenante de la erosión en Móstoles 1: Febrero de 2010	148
5.2.4.2.2. Evento de precipitación desencadenante de la erosión en Móstoles 2: Diciembre de 2010	148
5.2.4.3. Resultados	153
5.2.4.3.1. Móstoles campo 1 (Mo-1)	153
5.2.4.3.2. Móstoles campo 2 (Mo-2)	158
5.2.5. Otros episodios erosivos	162
5.2.5.1. Episodios erosivos estudiados dentro del proyecto MANERO	162
5.2.5.2. Episodio erosivo de Rielves, Toledo	164
5.3. Discusión de los resultados obtenidos en los episodios erosivos	170
5.4. Conclusiones	182
6. PRECISIÓN Y EFICIENCIA DE DIFERENTES PROPUESTAS METODOLÓGICAS PARA LA MEDICIÓN EN CAMPO DE LA EROSIÓN POR REGUEROS Y/O CÁRCAVAS EFÍMERAS	185
6.1. Introducción y objetivos	187
6.2. Software Rill Morphometer	191
6.3. Métodos alternativos propuestos	192
6.3.1. Método de los Transectos equidistantes según Distancias oblicuas (MTD)	193
6.3.1.1. Método MTD considerando longitudes equivalentes de la red de regueros (MTD-Le)	193
6.3.1.2. Método MTD considerando longitudes totales de la red de regueros (MTD-Lt)	194
6.3.2. Método de los Transectos equidistantes según diferencias de Cota (MTC)	195
6.3.2.1. Método MTC considerando longitudes equivalentes de la red de regueros (MTC-Le)	195
6.3.2.2. Método MTC considerando longitudes totales de la red de regueros (MTC-Lt) ..	196
6.4. Determinación de la precisión y del potencial ahorro temporal de los métodos alternativos propuestos	196
6.4.1. Método de los Transectos equidistantes según Distancias oblicuas (MTD)	198
6.4.1.1. MTD-Le: MTD considerando longitudes equivalentes (Le). Precisión del método: Resultados y discusión	198
6.4.1.2. MTD-Lt: MTD considerando longitudes totales (Lt). Precisión del método: Resultados, discusión y conclusiones preliminares	200
6.4.1.3. Ahorro potencial en la medición del número de secciones transversales aplicando el método MTD	201
6.4.2. Método a partir del trazado de Transectos equidistantes según diferencias de Cota (MTC)	202

6.4.2.1. MTC-Le: MTC considerando longitudes equivalentes (Le). Precisión del método: Resultados y discusión	203
6.4.2.2. MTC-Lt: MTC considerando longitudes totales (Lt). Precisión del método: Resultados y discusión	204
6.4.2.3. Ahorro potencial en la medición del número de secciones transversales aplicando el método MTC.....	206
6.4.3. Discusión general.....	207
6.4.3.1. Determinación de la influencia de la separación entre transectos en la precisión de los resultados de pérdida de suelo	208
6.4.3.2. Influencia en la precisión de los resultados obtenidos de la utilización de longitudes totales o longitudes equivalentes.....	210
6.4.3.3. Determinación de la equidistancia óptima para cada uno de los métodos alternativos propuestos.....	214
6.5. Obtención de las longitudes de las redes de regueros	217
6.5.1. Restitución fotográfica para la obtención de las longitudes de las redes de regueros. Método combinado de fotogrametría y transectos.....	218
6.5.1.1. Método combinado de fotogrametría y transectos. Desarrollo en campo	218
6.5.1.2. Método combinado de fotogrametría y transectos. Desarrollo en gabinete	218
6.5.1.3. Cuantificación del error introducido al aplicar el método combinado de fotogrametría y transectos	219
6.6. Resultados finales	222
6.7. Procedimiento para la selección previa del método óptimo de toma de datos en campo en cada circunstancia	223
6.7.1. Determinación del error introducido al aplicar el procedimiento para la selección previa del método óptimo de toma de datos en campo	225
6.8. Futuras líneas de investigación: aplicación de la fotogrametría moderna (Structure from Motion, SfM) y uso de drones.....	227
6.9. Conclusiones	228
7. INFLUENCIA DE LA TOPOGRAFÍA Y LA RUGOSIDAD ORIENTADA EN LA EROSIÓN POR REGUEROS Y CÁRCAVAS EFÍMERAS	231
7.1. Introducción.....	233
7.2. Procesos erosivos de vaguada: relaciones de la pendiente y la superficie de la cuenca de drenaje con las secciones de las cárcavas efímeras	234
7.3. Procesos erosivos de ladera: relaciones de la pendiente y la superficie de la cuenca de drenaje con las secciones de los regueros.....	240
7.3.1. Episodio erosivo de Arroyomolinos	240
7.3.2. Episodio erosivo de Villarrubia de los Ojos.....	244
7.3.3. Episodio erosivo de Paracuellos del Jarama-Ajalvir.....	248
7.4. Síntesis de los resultados	252
7.5. Influencia de la rugosidad orientada sobre las morfologías de las redes de regueros y las tasas de erosión en los procesos erosivos de ladera	254
7.5.1. Influencia de la rugosidad orientada sobre las morfologías de las redes de regueros.....	254

7.5.1.1. Diferencias en los procesos de formación de los regueros confinados y los dendríticos	256
7.5.2. Influencia de la morfologías de las redes de regueros sobre las tasas de erosión en los procesos erosivos de ladera	263
7.5.2.1. Episodio erosivo de Paracuellos del Jarama - Ajalvir	264
7.5.2.2. Episodio erosivo de Villarrubia de los Ojos.....	270
7.5.2.3. Episodio erosivo de Arroyomolinos.....	275
7.5.2.4. Episodios erosivos de Rielves, Cebolla y Pedro Muñoz	278
7.5.2.4.1. Episodio erosivo de Rielves (Toledo).....	279
7.5.2.4.2. Episodio erosivo de Cebolla (Toledo)	284
7.5.2.4.3. Episodio erosivo de Pedro Muñoz (Ciudad Real)	284
7.5.2.5. Síntesis de los resultados.....	285
7.5.3. Influencia de la rugosidad orientada sobre las tasas de erosión en los procesos erosivos de ladera.....	290
7.6. Conclusiones	296
8. ANÁLISIS DEL LABOREO EN CONTORNO COMO ESTRATEGIA PARA LA CONSERVACIÓN DEL SUELO.....	299
8.1. Introducción.....	301
8.2. El desarrollo de la USLE y, posteriormente, de la RUSLE	302
8.2.1. El concepto de parcela de referencia	306
8.2.2. El origen de la RUSLE	307
8.2.3. El factor P de la RUSLE	307
8.3. Valores del factor P para el laboreo en contorno.....	310
8.3.1. El laboreo en contorno y el factor P	310
8.4. Contradicción entre los postulados del factor P de la USLE/RUSLE y los resultados obtenidos en este estudio	314
8.4.1. La importancia de los eventos meteorológicos desencadenantes de erosión por flujos concentrados	315
8.4.1.1. Importancia de los episodios de moderada y baja intensidad en comparación con los episodios de lluvia de elevada intensidad: efectividad del laboreo en contorno en ambos escenarios	316
8.4.2. La importancia de la escala en el estudio de los procesos erosivos: consecuencias sobre la determinación de la efectividad del laboreo en contorno	317
8.4.3. El laboreo en contorno y su aplicación práctica	322
8.5. Conclusiones	324
9. CONCLUSIONES.....	325
10.BIBLIOGRAFÍA.....	331
11.ANEXOS.....	355

1.RESUMEN Y ABSTRACT

RESUMEN

El suelo es un recurso natural no renovable a escala temporal humana y el soporte básico imprescindible para la existencia de ecosistemas terrestres. Son particularmente sensibles ante la degradación del suelo los ecosistemas agrícolas dado que su productividad depende, en última instancia, de las cualidades y estado de conservación del suelo. En la región mediterránea se da una combinación de características físicas y ambientales que potencia los procesos de erosión y la degradación del suelo. En este contexto, la erosión hídrica constituye uno de los principales procesos de degradación. Los resultados de este trabajo han revelado que cerca del 70% de las tasas anuales medias de pérdida de suelo corresponden a la erosión hídrica ligada al desarrollo de regueros y/o cárcavas que tiene lugar durante episodios erosivos que pueden ser clasificados como extremos. Por ello, estos episodios deben ser considerados claves a la hora de evaluar la eficacia de las distintas alternativas de prácticas agronómicas y planes de conservación del suelo, especialmente todas aquellas incluidas en la legislación derivada de la Política Agraria Común europea (PAC). El objetivo final de esta Tesis, titulada: *“Influencia de los patrones de laboreo sobre la respuesta erosiva durante episodios extremos de erosión en paisajes agrícolas de secano mediterráneo”*, es evaluar la efectividad del laboreo en contorno, promovido por las diferentes normativas derivadas de la PAC, como práctica de conservación del suelo en las condiciones ambientales mediterráneas de la región central de España. Para ello, se ha caracterizado y cuantificado la erosión por flujos concentrados en cuarenta y ocho pequeñas cuencas hidrológicas de campos labrados y mantenidos en barbecho, relacionando las tasas de erosión obtenidas con los episodios de precipitación desencadenantes de la erosión, así como con las características topográficas y la rugosidad orientada presente sobre las laderas agrícolas. A su vez, se ha detectado la necesidad de implementar protocolos de campo alternativos, en ciertas circunstancias, a la aplicación del Método de la Nube de Puntos (MNP) sobre las redes dendríticas de regueros, con el objetivo de poder ampliar al máximo la información de campo disponible sobre tasas reales de erosión y respuestas hidrológicas de las distintas prácticas agrícolas, siempre con la mayor precisión posible. El MNP se basa fundamentalmente en la caracterización con detalle de la totalidad de las confluencias entre canales existentes en las redes dendríticas, así como en la medición de un buen número de secciones intermedias entre confluencias. Tal cantidad de información hace muy preciso el método, requiriendo, sin embargo, de una importante dedicación temporal para su aplicación. Por ello, utilizando como referencia el método de los transectos de control, han sido propuestas hasta cuatro alternativas buscando conjugar eficiencia temporal y precisión: Método de los Transectos equidistantes según Distancias oblicuas (MTD), considerando Longitudes equivalentes (MTD-Le) o considerando Longitudes totales (MTD-Lt) y Método de los Transectos equidistantes según diferencias de Cota (MTC), considerando Longitudes equivalentes (MTC-Le) o considerando Longitudes totales (MTC-Lt). No se busca una alternativa única, ni sustituir el MNP en toda circunstancia, sino poder adecuar los métodos empleados a las diferentes circunstancias y necesidades existentes, siempre conociendo los errores introducidos en el cambio. Desde el punto de vista del análisis de los errores no se supera, en la aplicación de cualquiera de las cuatro propuestas, el 14.5% de error para equidistancias máximas entre transectos de 7 m en longitud oblicua o de 1 m en diferencia de cota, reduciendo el número de medidas a tomar en campo de forma significativa. Por otro lado, los resultados obtenidos muestran que en el secano mediterráneo los episodios erosivos extremos: a) tienen, de forma generalizada, tasas de erosión elevadas, “no tolerables” en un buen número de casos; b) ocurren asociados a dos escenarios meteorológicos: situaciones de temporal -propias de periodos invernales, en las que se encadenan varios días de lluvia consecutivos de intensidad baja o moderada, llegando a saturar el perfil del suelo- y tormentas aisladas -de moderada y alta intensidad típicas de la estación seca, en las que la intensidad de lluvia supera la capacidad de infiltración del suelo-; c) presentan respuestas hidrológicas y erosivas fuertemente condicionadas por la dirección del laboreo, especialmente en aquellas laderas con superficies

planas y menos influenciadas por los factores topográficos. En función de la dirección del laboreo presente sobre la ladera se han identificado y caracterizado dos morfologías de redes de regueros: regueros paralelos y confinados en los surcos de labranza y redes de drenaje dendríticas. Mientras los procesos de formación de los regueros confinados responden a procesos hortonianos clásicos de incisión de cabeceras por superación del esfuerzo cortante crítico sobre laderas labradas a favor de la máxima pendiente; la formación de redes dendríticas se desencadena por superación de la capacidad máxima de retención de agua que ofrecen los surcos sobre laderas labradas en contorno o en dirección oblicua a la máxima pendiente. Estas diferencias en los patrones de los procesos erosivos tienen su reflejo en las tasas de erosión asociadas a cada una de las morfologías: las redes dendríticas de regueros duplican, como mínimo, las tasas medias de erosión de las redes confinadas de regueros, para un mismo evento de precipitación. Asimismo, cuanto mayor es la densidad de drenaje de las redes dendríticas mayores son las tasas de erosión producidas, lo cual está relacionado directamente con la existencia de un mayor ángulo entre la dirección de la labranza y la máxima pendiente. En este contexto, destaca que la labranza en contorno se ha revelado como una práctica que no sólo no es efectiva para controlar la erosión hídrica en el secano mediterráneo, sino que intensifica dramáticamente los efectos erosivos que tienen lugar asociados a estos episodios erosivos extremos. Este contraste entre los resultados obtenidos en este trabajo y la efectividad atribuida al laboreo en contorno como técnica para la conservación del suelo que promulgan las diferentes normativas derivadas de la PAC y que tiene su origen fundamentalmente en los modelos USLE/RUSLE, se debe a que el diseño experimental desde el que se obtuvieron los datos para definir tal conclusión, fundamentalmente parcelas de erosión tipo USLE, no permite evaluar, por su anchura limitada, la respuesta hidrológica y erosiva del laboreo en contorno y, por tanto, comparar su eficacia con el laboreo a favor de la máxima pendiente.

ABSTRACT

Soil is a natural resource non-renewable at a human temporal scale and essential for the existence of terrestrial ecosystems. Agricultural systems are especially sensible to soil degradation as their productivity depends directly on the health and quality of the soils. The Mediterranean region is particularly prone to erosion and soil degradation due to a combination of physics and environmental factors. Within this context water erosion is one of the main processes of soil degradation. The results obtained showed that about 70% of the average annual soil detachment rates correspond to water erosion due to concentrated flows (rill and gully erosion) that takes place during extreme episodes of water erosion. Therefore, those extreme erosive episodes should be the key factor in order to identify effective soil conservation practices and conservation plans, like those derivate from the European Common Agriculture Policy (CAP). The ultimate Thesis purpose, entitled "Influence of tillage patterns on the erosive response during extreme episodes of water erosion in Mediterranean rainfed agricultural landscapes", is to evaluate the effectiveness of the contour tillage, promoted by the CAP, in relation to its erosive response in environmental conditions of the Mediterranean central Spain. In order to do this, the erosion by concentrated flows has been characterized and quantified in forty eight small hydrological basins of fallow fields. The soil detachment rates obtained were related with the rainfall events that trigger the erosion, as well as topographic characteristics and the tillage-oriented roughness present on the agricultural slopes. At the same time, the necessity to implement alternative field protocols, under certain circumstances, to the Point Cloud Method (PCM) on rill dendritic systems has been detected, in order to maximize the available field information on current soil detachment rates and hydrological responses of the different agricultural practices, always with the highest possible accuracy. The PCM method consist in the detailed measurement of all the channel confluences on the rill dendritic systems, as well as in the measurement of an intermediate cross sections between confluences. The PCM method always provided the most precise measurements but on large rill systems the detailed characterization of a huge number of cross sections is restricted because it is time consuming. Therefore, using as a reference the method of control transects, four alternative field protocols have been proposed seeking to conjugate temporal efficiency and accuracy. The purpose is to provide information for a suitable assessment of rill and ephemeral gully erosion with such direct measurement methods. To achieve this objective: a) the measurement errors associated to four alternative methods used for field assessment of rill dendritic systems are explored; b) the influence of the number of control transects used per unit channel length on the assessment accuracy is analysed and; c) the effect of the photogrammetry application on measurement errors is examined. The four alternative methods considered to characterize and quantify the soil detachment rates on rill dendritic systems were: Equidistant Transects Method according to oblique Distances (TMD) considering Equivalent Lengths (TMD-EL) or considering Total Lengths (TMD-TL) and Equidistant Transects Method according to Height differences (TMH) considering Equivalent Lengths (TMH-EL) or considering Total Lengths (TMH-TL). The volume calculated with PCM method was taken as the reference method. The absolute value of the relative measurement error not higher than 14.5% were obtained, applying any of the four alternative methods, for maximum equidistance between transects of 7 m in oblique and 1 m in height. The application of these methods significantly reduces the number of cross sections to be measured. On the other hand, the results obtained showed that extreme erosive episodes in the Mediterranean rainfed landscapes: a) caused high erosion rates, "non-tolerable" in a significant part of cases; b) occurred in two meteorological scenarios: typically winter periods -in which soil is close to saturation and moderate intensity rains are enough to cause great magnitude erosion processes- and high intensity rainfall events -usually associated with convective cells of vertical development-; c) presented hydrological and erosive responses strongly influenced by tillage patterns, especially in less influenced by topographic factors slopes. Depending on the tillage patterns, two rills morphologies have been identified and characterized: furrow-confined

parallel drainage networks and dendritic drainage networks. The furrow-confined rills formation processes responded to a Hortonian classic head incision processes on upslope and downslope tillage landscapes, whereas the dendritic systems formation processes was triggered by overcoming the maximum water capacity offered by furrows on contour or oblique-tillage slopes. These differences in the erosive processes have been reflected in the soil detachment rates associated to each morphologies: the dendritic systems duplicate at least the average soil detachment rates of the furrow-confined rill systems. Moreover, the greater dendritic systems drainage density was, the larger soil detachment rates produced, which is directly related to the existence of a greater angle between the tillage direction and the maximum slope direction. In this context, it is important to note that the conservation practice of contour tillage has been demonstrated not to be effective to control soil erosion in Mediterranean rainfed agricultural landscapes, furthermore increases dramatically the extreme erosive episodes effects. The contrast between the results obtained in this Thesis and the effectiveness attributed to the contour tillage as a soil conservation technique promoted by the CAP, whose origin was mainly based in the USLE/RUSLE models, is due to the experimental design from which the data were obtained to define such conclusion, mainly USLE erosion plots, did not allow to evaluate hydrological and erosive response of contour tillage and, therefore, to compare its efficiency in controlling rill and gully erosion with upslope and downslope tillage.

2.INTRODUCCIÓN

2.1. Degradación del suelo por erosión

La palabra erosión proviene del latín erosio, -onis, “*roedura*”. El Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española lo define en su primera acepción como: “*Desgaste o destrucción producidos en la superficie de un cuerpo por la fricción continua o violenta de otro*”. En su segunda acepción se encuentra un sentido más geológico de la erosión, definiéndose como: “*Desgaste de la superficie terrestre por agentes externos, como el agua o el viento*”. Haciendo referencia al suelo, en términos generales, supone la remoción de la capa más superficial del mismo, sea cual sea el agente responsable: agua, viento, hielo, actuaciones humanas, etc. disminuyendo su capacidad actual y potencial para producir, cuantitativamente y/o cualitativamente, bienes o servicios (FAO-PNUMA-UNESCO, 1980).

Los procesos de erosión han actuado durante millones de años, formando parte de la dinámica natural del medio exógeno terrestre y constituyendo uno de los procesos más importantes responsables del cambio en el modelado de la superficie de la Tierra a lo largo de la historia geológica. La erosión está integrada dentro del proceso de formación del relieve terrestre y constituye, en cierto modo, parte de un ciclo cerrado en equilibrio. Sin embargo, este proceso natural se ve fuertemente incrementado en aquellas zonas donde las actividades humanas han modificado el equilibrio de los factores naturales. Por ello, muchos autores distinguen entre “*erosión geológica*” y “*erosión antrópica o acelerada*”, refiriéndose esta última a la intensificación de los procesos de erosión como consecuencia de la actividad humana. “*El ser humano es en todas partes un agente perturbador, donde se instala, las armonías de la naturaleza se rompen*” escribió George Perkins Marsh en 1864 en su obra “*Hombre y Naturaleza*”. Dentro de estas actividades, la agricultura es una de las que más erosión produce, dejando el suelo desprotegido de la cubierta vegetal, compactando la superficie, alterando el flujo del agua de escorrentía, etc.

La erosión antrópica actúa a un ritmo muy por encima del esperable en condiciones naturales y representa un fuerte aumento de las tasas de pérdida de suelo, a veces varios órdenes de magnitud por encima de las propias tasas de la erosión geológica (García Ruíz y López Bermúdez, 2009). A partir de la década de los 70 del siglo pasado, y sobre todo con más fuerza a partir de 1990, se produce un cambio importante en la percepción del problema. Se reconoce, cada vez más, que la intensificación de la agricultura ha supuesto un alto coste medioambiental y los problemas de degradación del suelo emergen a un primer plano. En aquellos años 70, se estimó que en breve tiempo un 20% del potencial total de los cultivos de secano podrían perderse si no se tomaban medidas de conservación en los suelos (Higgins et al., 1974, en Aguilo Bonnin, 1981). En este contexto, se inició una línea de conservación del recurso suelo a escala global, que en Europa vio la luz por primera vez en 1972 con la Carta Europea de los Suelos, trabajo que se continuaría, ya a escala global, en 1982, con la aprobación de la Carta Mundial de los Suelos, que tuvo repercusiones económicas y medioambientales y que ha ido completándose en diferentes versiones, siendo la última de 2015 (FAO, 2015).

En esta línea, el Programa de las Naciones Unidas para el medio ambiente (*United Nations Environment Programme*, UNEP) en 1992, reconoce que la degradación del suelo es el principal proceso inducido por la actividad humana responsable de la degradación en zonas áridas (*dryland degradation*, que incluye ambientes desde hiperáridos hasta subhúmedos secos). El Atlas del Mundo de Desertificación (UNEP, 1992), señala a partir de datos del GLASOD (*Global Assessment of Soil Degradation Database*) que la degradación de tierras áridas se debe en un 48% a procesos de erosión hídrica, que la erosión eólica es responsable del 39% y que a la degradación química y física del suelo corresponden el 10% y 4%, respectivamente. En la Unión Europea, la erosión del suelo causada por las actividades humanas ha sido identificada como una de las amenazas ambientales más importantes que afecta con mayor o menor intensidad a un cuarto de su superficie (European Environment Agency, EEA, 2005). En la actualidad la

erosión del suelo ha desbordado el ámbito de lo puramente científico para entrar a formar parte de los tópicos ambientales del siglo XXI.

En este aspecto, la región Mediterránea es la más amenazada, con áreas en las que la erosión ha conducido a un estado irreversible de degradación y en algunos casos a una desaparición total del suelo (EEA, 2003). No se trata de un fenómeno reciente, sino más bien crónico en la cuenca mediterránea. Sin embargo, en varias regiones de clima mediterráneo una combinación de factores naturales (sensibilidad del suelo, etc.) y antrópicos (gran intensificación de las actividades humanas y las prácticas agrícolas) ha causado un aumento de los riesgos por erosión hídrica durante los últimos decenios (Kosmas et al., 1997; Martínez-Casasnovas y Sánchez Bosch, 2000; Martínez-Casasnovas et al., 2005; Millennium Ecosystem Assessment, 2005). Según cifras provenientes del Ministerio de Medio Ambiente (MARM, 2005), un 30% de la superficie de nuestro país se ve afectada por tasas de erosión que son calificadas como medias (pérdidas de suelo de $10\text{-}50\text{ Mg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$) y más de un 10% por tasas altas ($>50\text{ Mg ha}^{-1}\text{ año}^{-1}$).

A estos datos de pérdida de suelo hay que añadir la naturaleza no renovable a escala temporal humana del recurso edáfico. Su degradación supone la mayoría de las veces su destrucción irreversible y en el caso límite, la desertificación del territorio. La formación de suelo fértil, susceptible de ser económicamente productivo, mediante la alteración del material original, es un proceso sumamente lento, medible únicamente en una escala de tiempo geológico (Duchafour, 1987). La formación de apenas 5 cm de suelo puede necesitar el transcurso de cientos e incluso miles de años, mientras que los procesos erosivos pueden actuar rápida y drásticamente. El equivalente a esos 5 cm de espesor de la capa superficial de suelo puede ser eliminado durante una única tormenta (Lal, 1990).

En consecuencia, desde una perspectiva conservacionista el objetivo debe consistir en mantener indefinidamente el potencial productivo de los suelos y, con ello, asegurar la sostenibilidad de las explotaciones agro-forestales por tiempo indefinido (Browning et al., 1947; Wischmeier y Smith, 1978; FAO, 1983). La intensa labor llevada a cabo, durante los últimos 30 años, por diversas organizaciones internacionales (UNEP, FAO, UNESCO, ISSS,...), para valorar de forma sistemática la extensión global que alcanzan los procesos de degradación del suelo contrastan con los escasos resultados obtenidos, no existiendo en la actualidad criterios globalmente aceptados.

Las observaciones y mediciones directas, el empleo de técnicas de teledetección, la aplicación de modelos y la evaluación paramétrica son los principales métodos que pueden contribuir a la evaluación de la degradación de los suelos. No es tarea fácil. Los diferentes procesos de degradación (erosión, salinización, acidificación,...) son procesos que se están produciendo de forma natural, estando sujetos a variaciones estacionales, anuales, etc., y que muestran una gran variabilidad. Separar a corto plazo, los cambios producidos por las variaciones naturales de aquéllos inducidos por la acción humana entraña una seria dificultad.

Los estudios de erosión se han centrado fundamentalmente en cuantificar la pérdida de material, lo cual tiene poco significado real para el agricultor. La tasa de erosión por si sola representa una pobre medida de la pérdida de productividad del suelo, ya que esta relación depende de las características del suelo. El concepto, no exento de crítica, *soil loss tolerance* (factor T) fue propuesto por el Servicio de Conservación del suelo de los Estados Unidos (*US Soil Conservation Service, SCS*) para dar solución a este problema (Colomer Marco y Sánchez Díaz, 2001). Es necesario conocer los límites tolerables de pérdida del suelo que no supongan una degradación progresiva de éste; es decir, cuando la tasa de pérdida de suelo no sea superior a la de su regeneración.

De forma generalizada, se considera la cantidad 11.2 Mg ha^{-1} como el límite máximo de tolerancia de erosión anual (Schmidt et al., 1982; FAO, 1988). Esta cantidad corresponde a una capa de suelo de 1 mm de espesor que sea removida uniformemente de la superficie, tomando como valor medio de densidad aparente del suelo 1.12 g cm^{-3} . No obstante, dicho límite tolerable de pérdida de suelo varía de manera importante para los distintos tipos de suelos, en función de su estado de conservación, profundidad y propiedades físicas y químicas.

El Servicio de Conservación de Suelos de EEUU (SCS, 1973 en McCormack et al., 1982) adoptó para la evaluación de las distintas alternativas de manejo los valores máximos de tolerancia de pérdida de suelo que se recogen en la tabla 2.1. Estos varían en función de la profundidad efectiva del suelo entre $11.2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (suelos con profundidad efectiva superior a 150 cm) y $2.2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (profundidad inferior a 25 cm). Además, la tolerancia disminuye cuando el sustrato sobre el que se desarrolla el suelo resulta desfavorable para la regeneración de éste, incluso aun cuando se apliquen prácticas de manejo tales como enmiendas orgánicas o aportes de fertilizantes químicos.

En España destaca el trabajo realizado por Moreira (1991) para la estimación de los valores máximos de tolerancia de pérdida de suelo en el Valle Central del Guadalquivir. Este autor aplica dos métodos distintos de evaluación, en función de las propiedades físicas del suelo y de la predicción de reducción por erosión de la productividad. En el primero de los casos, las tolerancias máximas obtenidas resultan muy similares a los valores del SCS (1973), variando entre 11.9 y $2.2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para suelos de profundidad efectiva superior a 150 cm e inferior a 25 cm respectivamente. Mientras que en el segundo caso, el autor determina la tolerancia máxima de pérdida de suelo con la condición de mantener la productividad de los suelos a un nivel equivalente al actual durante un plazo de al menos 1000 años. En ese caso, los valores se reducen de forma drástica. Así, por ejemplo, la tolerancia máxima de pérdida de suelo se reduce a $0.2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para suelos con una profundidad inferior a 25 cm, se sitúa entre 1.1 y $1.8 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para suelos de 50 cm, entre 1.7 y $2.5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para suelos de hasta 100 cm y tan sólo llega a $7.1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en el caso de suelos más profundos que 150 cm (tabla 2.1).

Tabla 2.1: Valores máximos de pérdida tolerable de suelo (SCS, 1973 y Moreira, 1991).

Profundidad efectiva del suelo	Sustrato favorable (SCS, 1973) ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)	Sustrato desfavorable (SCS, 1973) ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)	Valle del Guadalquivir Moreira (1991) ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$)
< 25 cm	2.2	2.2	0.2
25 – 50 cm	4.5	2.2	1.1-1.8
50 – 100 cm	6.7	4.5	1.7-2.5
100 – 150 cm	9.0	6.7	5.0-7.0
> 150 cm	11.2	11.2	5.3-7.1

No obstante, la definición del término pérdida tolerable de suelo y el establecimiento de la tasa máximas tolerables (T) resultan complejos y han sido objeto de controversia, pasando por enfoques centrados en aspectos agronómicos (productividad, calidad del suelo), geológicos (tasa de formación de suelo, tasa de meteorización) y socio-económicos (daños a infraestructuras, contaminación de aguas), existiendo diversas propuestas en la literatura.

Por ejemplo, basados en consideraciones agronómicas, Smith y Stamey (1965) proponen un límite T de $5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ en zonas como la mediterránea, donde el suelo presenta un escaso desarrollo; Hudson (1971) recomienda que en suelos superficiales o altamente erosionables se debe asumir como tasa máxima $2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$; mientras que Schertz (1983) considera que, cuando el suelo supera los 2 m de profundidad, es muy poco probable que, como consecuencia de la erosión, el subsuelo capaz de influir en la productividad de las cosechas se vea afectado en un periodo superior a 50 años, por lo que incrementa el valor de T hasta $20 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Por su parte, Boellstorff y Benito (2005) consideran que la tasa T debe ser calculada a partir de las propiedades subsuperficiales del suelo que limitan el crecimiento de las raíces, citando como los

factores más importantes la profundidad de la roca madre, la presencia de superficies cementadas o costras, los niveles subsuperficiales arenosos, los cambios abruptos en la textura, los horizontes o capas duras, el contenido en fragmentos rocosos, el alto contenido en yeso y/o carbonatos, y la presencia de suelos altamente erosionados. Según estos autores, en la mayoría de las ocasiones, los valores de T varían de 1 a 13 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (López Vicente, 2007).

Tasas muy inferiores se citan en Pimentel (2006), que a partir de los trabajos de Troeh y Thomson (1993); Lal (1994); Pimentel et al. (1995); Young (1998) y Sundquist (2000), establece que la tasa de formación de suelos bajo condiciones agrícolas en Estados Unidos y Europa fluctúa en un rango entre 0.5 y 1 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Por otro lado, Verheijen et al. (2008) indican para Europa un rango de pérdidas tolerables entre 0.3 y 1.4 Mg ha⁻¹ año⁻¹, dependiendo del ratio de formación del suelo y entendiendo por pérdida tolerable aquella que no deteriore, menoscabe o elimine una o más funciones del suelo.

2.2. Erosión hídrica en campos agrícolas

La agricultura ha sido la actividad humana que mayor incidencia ha tenido sobre el suelo a lo largo de la historia. Se puede decir, tal y como apunta Rosselló que, desde su aparición en el Neolítico, *“erosión y agricultura quedarían hermanadas para siempre”* (Rosselló, 1993 en Martin de Santa Olalla, 2001). Propició desde sus inicios suelos poco protegidos por la vegetación, recurrentemente labrados y sobre los que se aplicaban incendios controlados para eliminar la vegetación natural (Cerdà, 2008). Más tarde, el desarrollo de sistemas de laboreo mediante tracción animal y la mecanización generalizada del siglo XX permitió aumentar la productividad, en el corto plazo, de los suelos agrícolas, sobreexplotándolos en muchas ocasiones e incrementando los riesgos de degradación del suelo. Es un hecho comprobado a nivel mundial que las tasas de erosión más elevadas coinciden con la modernización de las prácticas agrícolas (proyecto LUCINDA -*Land Care In Desertification Affected Areas*-, 2008). Sin embargo, la importancia de conservar un suelo de buena calidad es particularmente patente en los sistemas agrícolas, donde la productividad va a depender, en buena medida, del estado de conservación del suelo.

La erosión acelerada, debido a estos cambios antrópicos, produce la reducción del espesor efectivo del perfil edáfico y, por tanto, del volumen de suelo explotable por la vegetación o el cultivo, debido a la incisión de regueros y/o cárcavas efímeras y/o a la erosión difusa. Esta erosión provoca pérdida de material del suelo, siendo las partículas más finas, las que absorben y retienen más nutrientes, las que primero se disgregan y se arrastran con mayor facilidad (Boulaine, 1981).

Dado que la pérdida de material afecta fundamentalmente a las capas superficiales del suelo, en las que reside la mayor fertilidad, su pérdida supone, en un primer momento, una merma significativa de los contenidos de materia orgánica y nutrientes (ver, por ejemplo, Poesen y Hooke, 1997; Woodward, 1999; Gunatilake y Vieth, 2000; Steegen et al., 2001; Verstraeten y Poesen, 2002; Ramos y Martínez-Casasnovas, 2004; Quiquerez et al., 2008), y a largo plazo pérdida de productividad y degradación de suelos (ver, por ejemplo, Lal, 1995; Roose, 1996; Alfsen et al., 1996; Gunatilake y Vieth, 2000), pudiendo llegar a su degradación irreversible. Este hecho puede causar grandes daños tanto ambientales, como económicos y sociales (Fournier, 1972; Le Bissonnais et al., 2002).

La erosión del suelo provoca, a su vez, una amplia gama de problemas ambientales derivados del transporte de sedimentos a la red de drenaje y embalses (ver, por ejemplo, Govers, 1991; Ludwig, 1992; Vansteelandt et al., 1997; Martin et al., 1998, en Valcárcel et al., 1999, Hansen et al., 2002; Le Bissonnais et al., 2002; Verstraeten et al., 2003). El transporte y la sedimentación

de las partículas erosionadas transforman aspectos fundamentales de la morfología fluvial, afectando a las zonas inundables, aumentando el riesgo de inundaciones y acortando la vida de los embalses (Clark, 1985; Boardman et al., 1994; Verstraeten y Poesen, 1999 en Alatorre, 2010). Los sedimentos también son una fuente muy importante de contaminación a través de la fijación de agroquímicos, incrementando los niveles de nitrógeno y fósforo en el agua y causando su eutrofización (Sibbesen, 1995; Steegen et al., 2001).

Se trata además de un proceso que se acelera según va evolucionando. La acción de los agentes erosivos provoca una degradación progresiva de la estructura física del suelo lo que, a su vez, va aumentando la vulnerabilidad de éste a ser degradado. Progresivamente el suelo pierde su capacidad de retención de agua y nutrientes, teniendo como resultado una pérdida de productividad que, en principio, limita las especies que pueden cultivarse y obliga a un aumento de los fertilizantes a aplicar para mantener los rendimientos de las cosechas y la producción de alimentos y, finalmente, lleva a la devaluación y en muchas ocasiones al abandono de la tierra (Morgan, 1986). Faeth y Crosson (1994) estimaron que cada año se abandonan en el mundo 10 millones de ha de tierras cultivables debido a la falta de productividad causada por los procesos de erosión y en la segunda mitad del siglo XX, cerca de un tercio de los suelos agrícolas de la Tierra dejaron de ser productivos para usos agrícolas (Pimentel et al., 1995).

Está ampliamente aceptado que la erosión del suelo es mayor en tierras agrícolas que en bosques, matorrales o praderas (Boardman et al., 1990, proyecto LUCINDA, 2008; proyecto SOCO -Sustainable Agriculture and Soil Conservation-, 2009). Choudhary et al. (1985) comparó las diferencias en la erosión del suelo entre patrones de cultivo y no cultivo, y constató que el valor de la erosión del suelo bajo cultivo fue 4.9 veces más que bajo ningún cultivo.

En terrenos de cultivo se pueden destacar tres tipos fundamentales de erosión hídrica: movimientos en masa, erosión por salpicadura y erosión por circulación de un flujo de agua sobre la superficie del terreno.

Los movimientos en masa (soliflucción, *soil flows*), deslizamientos (*slides*) y arrastres (*creeps*), son deslizamientos ladera debajo de porciones de suelo que se vuelven inestables. En este caso el agua afecta a la estructura interna del suelo y modifica su resistencia por la disminución de la cohesión interna y el aumento de peso.

La erosión por salpicadura (*splash erosion*) es la causada por el impacto de gotas de agua sobre el suelo, que arrancan y transportan partículas del mismo, pudiendo desplazarlas algunos centímetros. Se trata de un tipo de erosión que afecta especialmente a suelos desnudos o con poca cobertura vegetal. En suelos susceptibles, como los ricos en limo, la acción de la gota de lluvia da lugar a modificaciones en la estructura superficial del suelo que facilitan la formación de costras superficiales, lo cual desencadena o incrementa la generación de escorrentía superficial.

La erosión por circulación de un flujo de agua sobre la superficie del terreno, es la causada por el agua de escorrentía. Esta puede concentrarse en vías preferentes, caso en el cual se hablaría de erosión por flujos concentrados, o puede extenderse como una lámina de agua de escaso grosor a lo largo de una importante superficie, caso en el cual se hablaría de erosión hídrica laminar.

Se entiende por erosión laminar (*sheet erosion*) a la pérdida uniforme de finas capas de suelo debido a la acción de un flujo homogéneamente distribuido sobre el terreno (ver, por ejemplo, Hillel, 1998), sin que se aprecie la presencia de incisiones en el terreno. La erosión laminar está causada por la acción combinada de la erosión por salpicadura junto con la existencia de un flujo de escorrentía en la ladera. Por sus características, este tipo de erosión es a menudo

imperceptible, aunque se hayan registrado grandes cantidades de pérdida de suelo, siendo difícil cuantificar el alcance de la misma (Flanagan, 2002). Las evidencias de la ocurrencia de este fenómeno pueden encontrarse en forma de pedestales sobre la superficie afectada, allí donde la escorrentía no ha podido transportar elementos mayores presentes en la ladera, como fragmentos de roca, que protegen el suelo sobre el que se asientan logrando conservarlo. No obstante, la erosión de tipo laminar es más una idealización que una realidad. Los procesos de erosión raramente ocurren uniformemente sobre el terreno afectado (Casalí et al., 2009). De hecho, el flujo erosivo, en su camino pendiente abajo, tiende rápidamente a concentrarse en canales o surcos, aunque normalmente poco apreciables en sus orígenes.

El desencadenamiento de un proceso de erosión laminar, ante ciertas condiciones (suficiente longitud en la ladera, irregularidades en el terreno,...), dan lugar a fenómenos de concentración del flujo, inicialmente en pequeños regueros, que pueden aumentar hasta dar lugar a cárcavas efímeras, e incluso a cárcavas permanentes. Cualitativamente, a los canalillos que aparecen en las laderas, que no suelen aparecer en la misma posición de la ladera tras cada evento erosivo y que pueden ser fácilmente obliterados con labores convencionales sobre el terreno, se les denomina regueros (*rills*). La erosión por regueros se da principalmente en suelos agrícolas, de ahí que también es frecuente que, en lugar de desarrollarse siguiendo un patrón dendrítico, lo hagan en cambio siguiendo las marcas en el terreno dejadas por el laboreo, surcos de labranza. En este último caso, los regueros se desarrollan en forma más o menos paralela, uniformemente espaciados y desconectados entre sí (Foster, 1986). Este espaciado regular ocurre principalmente en regueros formados sobre materiales homogéneos (ver, por ejemplo, Schumm, 1956). Los regueros pueden, al incrementar su tamaño, dar lugar eventualmente, a la formación de cárcavas.

Las cárcavas (*gullies*) no se distinguen morfológicamente de los regueros más allá de por su tamaño, formas algo mayores, que suelen aparecer entre laderas aprovechando las zonas cóncavas de los campos de cultivo. Drenan superficies mayores, de ahí su mayor tamaño, y suelen desarrollarse tras cada evento erosivo en la misma localización sobre el campo de cultivo.

Es necesario apuntar que, cuantitativamente, no existe un criterio claro y preciso para la distinción entre reguero y cárcava, ya sea esta última efímera o permanente (Bradford y Piess, 1980; Foster, 1982). No obstante, existe un amplio acuerdo en establecer la diferencia en función de las dimensiones de la sección del canal. La sección más ampliamente aceptada es la de 0.093 m², como sección límite entre reguero y cárcava (Poesen y Govers, 1990; Vandaele, 1993). Por otro lado, la diferencia entre cárcava efímera y permanente se establece comúnmente en función de la interferencia que produce en las labores agrícolas convencionales: si no es posible redistribuir el suelo y hacer desaparecer, al menos temporalmente, la cárcava, entonces se considerará permanente. Sin embargo, Merkel et al. (1989) tratan de cuantificar este valor y apuntan que cuando el canal supera la profundidad de 0.46 metros la cárcava puede ser considerada como permanente.

Los procesos de erosión por flujos concentrados son más frecuentes en suelos con elevada dispersión de arcillas, mientras que los procesos de erosión laminar predominan en suelos con mayor estabilidad de los agregados (Benito et al., 1993, en De Santisteban, 2003). En el proceso de dispersión, el transporte de las arcillas sella pequeños huecos disminuyendo la porosidad, a la vez que destruye la estructura del suelo. Por lo tanto, el agua fluye concentrándose en rutas específicas, donde experimenta un incremento del esfuerzo cortante necesario para arrancar y transportar partículas (Benito et al., 1993, en De Santisteban, 2003).

2.3. Erosión por flujos concentrados

La erosión por flujos concentrados, regueros y/o cárcavas efímeras, supone un elevado porcentaje de la erosión total en los campos cultivados. Existen diversos estudios al respecto en los que, aun variando las cifras, se observa como la erosión por flujos concentrados representa la mayor parte de la erosión que se produce en los suelos, tanto por los valores absolutos que alcanzan como por los porcentajes de erosión que suponen respecto a la tasa de erosión hídrica total producida. Govers y Poesen (1988) cifraron la erosión laminar en un 10% del valor total de la erosión, por lo tanto correspondería al 90% restante la erosión generada por flujos concentrados. Poesen et al. (1997) cifra el valor de la erosión por regueros en el 80% de la erosión total en un estudio realizado al Sur de la Península Ibérica, valor que también considera De Alba (1998).

Por lo tanto, estimando la erosión por flujos concentrados, mediante la cubicación de los canales, se puede obtener una adecuada aproximación a los valores de la erosión total que revele la importancia del fenómeno en sentido amplio. Sin embargo, resulta importante reseñar que los volúmenes de erosión cuantificados deben ser considerados como valores mínimos de pérdida de suelo (Loughran, 1989; Evans, 1995) ya que únicamente se consideran las mediciones de los canales incididos que, además, permanecen bien definidos tras terminar el episodio erosivo.

La iniciación de la erosión hídrica es un problema extremadamente complicado que tiene aún numerosas lagunas. De forma casi intuitiva se puede afirmar que un reguero se forma donde la escorrentía superficial se concentra, lo que inicia la erosión y canalización. Cuando la intensidad del flujo aumenta, aumenta la capacidad de arranque de partículas, lo cual es función de la intensidad del flujo (Poesen et al., 1990). Existen diversas medidas de esta intensidad del flujo como son el esfuerzo cortante, la velocidad cortante y la potencia del flujo (Poesen, 1993).

En 1945, Horton introduce el concepto de umbral en relación con la topografía, haciendo referencia a un valor de resistencia del suelo a la incisión que debe superar el flujo de escorrentía para que se produzca erosión. La potencia del flujo, que es el agente erosivo, depende del producto caudal por pendiente. Hay un umbral de la potencia por encima del cual se inicia un reguero en una localización concreta (Thorne et al., 1986).

El mismo Horton, definió la longitud del flujo de escorrentía como la distancia que recorre este flujo antes de concentrarse dentro de canales de drenaje, en este caso regueros, y de esta forma, relaciona esta distancia con el valor umbral para el cual el flujo alcanza la energía necesaria para erosionar, alcanza el esfuerzo cortante crítico, siendo este el lugar donde se formará una cabecera. La forma de la cuenca de drenaje tiene incidencia en la determinación del lugar potencial de aparición de una cabecera. Considerando que es necesaria una concentración de escorrentía, descarga, mínima suficiente para superar el esfuerzo cortante crítico y que dicha descarga está relacionada directamente con el área existente aguas arriba. El concepto de aparición potencial hace referencia al punto sobre el cual existe una superficie colectora mínima que permita concentrar dicha escorrentía, y no al lugar en el que aparece en un momento determinado la cabecera en unas condiciones de erosión concretas.

Según Burkam (1966; citado en De Santisteban, 2003) existe un alto grado de correlación entre descarga y área de drenaje de la cuenca en zonas semiáridas, lo cual sugiere la posibilidad de utilizar el área para estimar la descarga, que en este caso sería la mínima necesaria para superar el esfuerzo cortante crítico, allí donde no se dispone del valor de la misma. También Flint (1974) justifica esta relación entre descarga (q) y área de drenaje (A), utilizando la eq. 2.1.

$$Q = a A^x \quad (\text{eq. 2.1})$$

Siendo a , un coeficiente proporcional a la escorrentía generada en una milla cuadrada y; x , un valor igual a 1 cuando se considera una descarga anual principal (o media anual) o menor a 1 para flujos mayores.

De nuevo Horton (1945) observó la existencia de un cinturón en la parte superior de la ladera sin presencia de regueros, a lo que llamo cinturón de no erosión (belt of no erosion). Estas áreas sin erosión están relacionadas con los conceptos anteriormente descritos de la relación entre descarga necesaria y área, o lo que es lo mismo, la existencia de valores umbrales de superficie colectora de la cuenca para el inicio de la incisión de los regueros.

La pendiente de la ladera o, en definitiva, la pendiente del propio reguero, junto a las características de los horizontes del suelo influyen en la anchura, y profundidad de los canales y, por consiguiente, en la relación entre ambas. La Relación Anchura-Profundidad (RAP) caracteriza la morfología de la sección de los canales, relacionando la anchura media de la sección respecto a la profundidad. Poesen (1993) destaca que esta relación permite de forma sencilla hacer una clasificación de los sistemas de regueros y cárcavas en función de los daños que producen. A mayor índice de RAP, los canales son más anchos que profundos, por tanto afectan a una mayor superficie de cultivo y, a su vez, un mayor porcentaje de suelo evacuado corresponderá con el horizonte superficial, con lo que aumenta la pérdida de suelo fértil, materia orgánica y nutrientes. Sin embargo, estos canales anchos pero poco profundos se eliminan fácilmente mediante las labores convencionales, enmascarando el problema de erosión existente, pero permitiendo continuar con el cultivo en las siguientes campañas sin perder superficie útil. En el caso contrario, unos valores de RAP bajos, y especialmente por debajo de 1, mayor profundidad del canal que anchura, disminuye los daños sobre el cultivo, ya que abarcará una menor superficie, pero a su vez dificultará más la redistribución del suelo para hacer que las incisiones desaparezcan, llegando incluso a formarse una cárcava permanente imposible de retrabajar mediante laboreo convencional, lo cual hará disminuir la superficie útil para cultivar en el futuro.

La relación anchura-profundidad está condicionada por la pendiente del terreno. Inicialmente a mayor pendiente el canal se desarrolla con mayor profundidad. Savat y De Ploey (1982), Govers (1985) y Poesen (1993) (en Casalí, 1997) encontraron que con una pendiente por encima de 0.03-0.04 la profundidad se incrementa rápidamente, siempre y cuando no exista un horizonte en profundidad lo suficientemente resistente como para impedir la profundización del reguero, incluso con importantes pendientes. En este caso la energía de la escorrentía se transformará hacia el crecimiento del canal en la horizontal, aumentando en anchura, siendo la RAP mayor.

También existe una relación de la RAP con la intensidad y el volumen de la precipitación. Una tormenta muy intensa aportará un caudal importante y los canales profundizaran menos tendiendo a ser más anchos con objeto de evacuar el agua más rápidamente, mientras que una lluvia de menor intensidad pero prolongada en el tiempo tendera a desarrollar incisiones de mayor profundidad que anchura, buscando el equilibrio del canal con el nivel de base, siempre en combinación con el factor pendiente y las características del suelo. En acontecimientos de precipitación moderada se da un flujo concentrado con suficiente poder erosivo, que si no encuentra un horizonte excesivamente resistente, originará una incisión con RAP aproximadamente igual a 1, que una vez alcance un horizonte más resistente, por ejemplo la suela de labor, se ensanchará aumentando considerablemente la RAP.

2.4. Erosión hídrica en España

En España, la importancia del impacto de los procesos erosivos en el medio agrícola queda de manifiesto si se tiene en cuenta que es el segundo estado comunitario en cuanto a extensión agrícola, solo por detrás de Francia. Con cerca de 25 millones de hectáreas de superficie agrícola utilizada, concretamente 24.892.520 hectáreas se dedican a la producción agrícola, lo que supone el 49.33% de la superficie total nacional, de las cuales, las comunidades de Castilla-La Mancha, Castilla y León, Andalucía y Aragón concentran tres cuartas partes del total (75.8%). De esta superficie, los cultivos herbáceos ocupan el mayor número de hectáreas, en concreto 11.887.456 hectáreas, lo que supone el 47.75% del total de la superficie cultivada. Les siguen los cultivos leñosos con un 35% del total de la superficie cultivada, siendo los olivares, frutales y viñedos la mayor parte de estos. Existen en la actualidad 2.208.041 ha de olivares (8.87%), 1.032.273 ha de viñedos (4.15%) y 1.102.546 ha de frutales (4.43%) (Censo Agrario del Instituto Nacional de Estadística, 2009) (figura 2.1). Esta gran extensión concede a los cultivos herbáceos de secano una enorme importancia desde el punto de vista de la erosión y la conservación del suelo (García Ruiz y López Bermúdez, 2009).

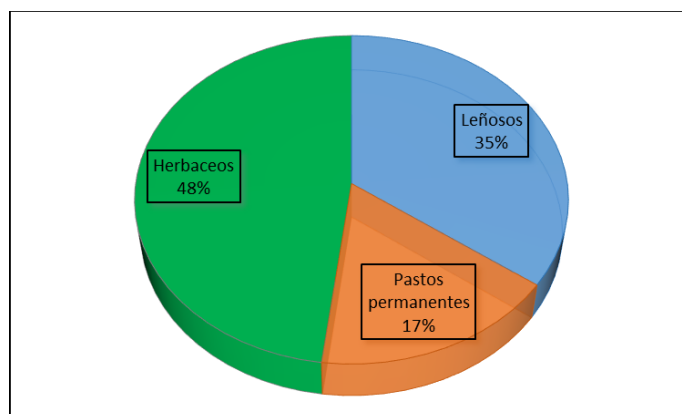


Figura 2.1: Distribución de la superficie agrícola utilizada en España (Censo Agrario del Instituto Nacional de Estadística, 2009)

De los países mediterráneos europeos, España es el que presenta tasas más elevadas de erosión actual y potencial (ICONA, 1982; CORINE, 1992; López Bermúdez, 1992; Añó Vidal et al., 1998; Giovanni et al., 2001; Solé Benet, 2006, en López Bermúdez y García Ruiz, 2008).

De los estudios realizados en España para evaluar la intensidad de los procesos de erosión hídrica destacan los Mapas de Estados Erosivos realizados por el ICONA y finalizados en 1991 (MOPT, 1992), en los que se estimaron las tasas potenciales de pérdida de suelo mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, USLE, conforme a los algoritmos y nomogramas de cálculo tal como fueron establecidos por Wischmeier y Smith (1978). El estudio abarcó toda la superficie nacional estructurando el territorio en tres zonas, dos en la franja mediterránea y otra para el resto de la Península (figura 2.2) y presentándose la cartografía de estados erosivos a una escala 1:400.000.

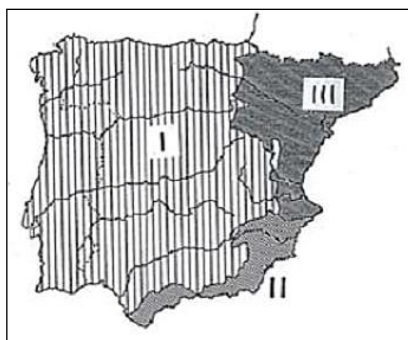


Figura 2.2: Zonas en que quedó dividida la Península Ibérica para el cálculo del factor R de la USLE (ICONA, 1988).

En dicho estudio se concluyó que la tasa de erosión anual media para el conjunto del territorio asciende a $23.37 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, es decir más del doble del valor considerado como máximo tolerable de pérdida de suelo en las mejores condiciones del mismo ($11.2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$). Según este estudio, en un 43.8% de la superficie total ($22.1 \cdot 10^6 \text{ ha}$) la tasa de erosión hídrica supera este último valor y en otro 18.1 % de la superficie total ($9.16 \cdot 10^6 \text{ ha}$) los procesos erosivos se manifiestan con una elevada intensidad (MOPT, 1991). Al mismo tiempo, el estudio puso de manifiesto la importancia de la degradación del suelo en los campos agrícolas, dado que el 73% de las pérdidas totales de suelo se produce en los campos de agricultura extensiva de cultivos arbóreos, viñedos y herbáceos de secano; y hasta el 11% tiene lugar en terrenos de erial o con matorral y arbolado disperso. La escala del estudio y la metodología empleada hacen que los valores aportados por el estudio deban ser considerados como referentes cualitativos del estado de la cuestión, más que como valores absolutos. Numerosos autores (ver, por ejemplo, Govers, 1991; Risse et al., 1993) han puesto de manifiesto que la aplicación de modelos sin la correspondiente calibración a las condiciones agroambientales reales da lugar a predicciones de pérdida de suelo con fuertes desviaciones respecto a los valores medidos con métodos de campo.

Sin embargo, el estudio del ICONA tiene una gran importancia para situar el estado de la cuestión, ya que la revisión bibliográfica revela una acusada falta de datos de campo obtenidos mediante medición directa en campos agrícolas de España. Apenas unos pocos trabajos (De Alba, 1998; Casalí, 1999a; Casalí, 1999b; García Ruiz, 1999; García Ruíz et al., 2000; Martínez Casanovas et al., 2002; De Santisteban, 2005; Cerdà, 2001 y 2008; Alcázar, 2013) aportan información necesaria para llevar a cabo una correcta evaluación del problema existente y de la eficacia de las prácticas de conservación más adecuadas en este contexto agroambiental. De todo lo anterior, se deduce que el proceso de toma de decisiones respecto a modelos de gestión del territorio que consideren como premisa la sostenibilidad de la calidad y cantidad de la productividad biológica de los suelos, requiere del conocimiento de las tasas reales (actuales) de degradación por erosión; así como de modelos predictivos que permitan evaluar la respuesta de las distintas alternativas de uso y sistemas de manejo del suelo para las características específicas del territorio (De Alba, 2002).

Un aspecto singular que dificulta la percepción por parte de la sociedad de la gravedad de la erosión del suelo en los paisajes agrícolas es el carácter efímero de los rasgos erosivos (De Alba et al., 2011). En comparación con otras zonas naturales, en las que los rasgos erosivos tales como las incisiones de regueros y cárcavas permanecen visibles sobre la superficie del suelo una vez que han sido generados, la degradación de los suelos en los campos agrícolas no es tan claramente manifiesta ya que las prácticas convencionales de laboreo eliminan periódicamente estos rasgos erosivos superficiales. Es común que, allí donde se han desarrollado rasgos erosivos tras una precipitación, estos permanezcan sobre la superficie afectada justo el tiempo necesario para que el suelo alcance unas condiciones óptimas que permitan realizar una operación de labranza con objeto de redistribuir el suelo y eliminar las formas erosivas. Este hecho hace

complicado en pocos días, si quiera cualitativamente, determinar el grado de erosión que se ha producido en una ladera agrícola tras un episodio de precipitación.

A pesar de la dificultad de visualizar directamente en campo las consecuencias de los procesos erosivos cuando éstos se producen, la observación detallada del paisaje si permite identificar los efectos acumulados a largo plazo. Así, el paisaje característico de los campos de agricultura extensiva mediterráneos muestra una presencia generalizada de suelos truncados en lomas y hombreras, y en general en los tramos convexos de las laderas. Esta elevada abundancia de suelos degradados en el paisaje revela la acción de procesos erosivos de elevada intensidad. Se trata de perfiles de suelo que han perdido por erosión total o parcialmente los horizontes edáficos superficiales (horizontes A y B), por lo que quedan expuestos en superficie los materiales pertenecientes a horizontes C originariamente subsuperficiales, o una mezcla de materiales de éstos horizontes con restos de los superficiales. De este modo el proceso da lugar a una reducción de la fertilidad del suelo (Gallardo et al., 1990)

Otro elemento que dificulta la detección de la gravedad de los procesos de degradación del suelo es la utilización de agroquímicos. La utilización de estos productos enmascara la pérdida de fertilidad, *ergo* de productividad, de un suelo. Además, su utilización conduce a una mayor reducción de la fertilidad natural del suelo, a la vez que termina generando una dependencia: sin agroquímicos el suelo ya no producirá o lo hará en menor cantidad de la deseada. Los costes que genera la dependencia en la aplicación de estos productos producen, en ocasiones, el abandono del cultivo por falta de rentabilidad de la explotación a medio plazo (De Alba et al., 2011).

2.5. El estudio de la erosión en España

Los estudios sobre la erosión del suelo con métodos científicos se inician en España más tarde que en otros países, hacia los años cuarenta del siglo pasado. Los trabajos de Pérez Urruti (1948), Roquero de Laburu (1954, 1964), García Nájera (1955) y Támes (1957) tuvieron una gran influencia en el posterior desarrollo de los estudios sobre la erosión en España (López Bermúdez y García Ruiz, 2008). Basándose en éstos trabajos, López Cadenas y Blanco Criado (1968) generaron una tabla de índices de protección del suelo por la vegetación y Magíster (1973) llevó a cabo una evaluación de la erosión hídrica, indicando que en el 16% de la superficie la erosión era inapreciable, moderada en el 45%, grave en el 29% y muy grave en el 10% de los suelos (López Bermúdez y García Ruiz, 2008).

Sin embargo, hasta la década de los ochenta no hubo un intento sistemático por entender el funcionamiento de los paisajes erosionados, los factores que los explican, el papel de los diferentes usos del suelo, o la influencia de las características específicas de los suelos sobre la infiltración y la generación de escorrentía a diferentes escalas espaciales (García Ruiz y López Bermúdez, 2009).

La actividad de la comisión de Procesos Experimentales en Geomorfología de la Unión Geográfica Internacional representó un cambio en la percepción de la erosión del suelo y de los métodos que debían emplearse para medir los procesos. Si bien, los grupos de investigación implicados en estudios sobre la erosión eran aún muy incipientes. La creación de la Sociedad Española de Geomorfología en 1987 tuvo una importancia decisiva para consolidar los estudios sobre erosión del suelo en España y los grupos de investigación dedicados a ellos, así como para la puesta a punto de cuencas y estaciones experimentales. García Ruiz y López Bermúdez (2009) realizan una descripción detallada de los equipos de trabajo pertenecientes a diferentes instituciones que dedican sus esfuerzos al estudio de la erosión y transporte de sedimentos,

destacando la mayor concentración de éstos en el litoral levantino y reduciéndose mucho la densidad hacia el interior.

En López Bermúdez y García Ruiz (2008) se recoge una revisión de los métodos y técnicas empleadas en los estudios de erosión de suelo en España. Destacan el empleo de piquetas/clavos/agujas de erosión, perfiladores microtopográficos (ver, por ejemplo, Sancho et al., 1991), parcelas abiertas y cerradas de diferentes dimensiones (ver, por ejemplo, Rubio et al., 1990; López Bermúdez et al., 1993; Boix Fayos et al., 2006; De Alba et al., 2009) y cuencas hidrológicas (Llorens y Gallart, 1992; Batalla et al., 1995; Ceballos y Schnabel, 1998; García Ruiz et al., 2005). Además, otros métodos tales como las batimetrías en embalses (Sanz Montero, 1998; Valero-Garcés et al., 1999), el empleo de radioisótopos como el Cesio 137 (Navas, 1995) o de imágenes de satélite en paralelo con sistemas de información geográfica (Beguería, 2005).

En este contexto, cabe destacar el diseño y puesta en marcha en 1995 de la Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y la Desertificación –RESEL– del Proyecto LUCDEME (Lucha contra la Desertificación en el Mediterráneo) del Ministerio de Medio Ambiente (Rojo Serrano y Sánchez Fuster, 1997). Conforme al catálogo de estaciones de la RESEL de 1996 (Rojo Serrano y Sánchez Fuster, 1997), la red cuenta con un total de 41 estaciones experimentales distribuidas por 10 comunidades autónomas abarcando una amplia variedad de situaciones ambientales (bioclimáticas, fisiográficas, geomorfológicas, de usos del suelo, vegetación etc.). Sin embargo, es importante señalar que tan sólo en las instalaciones de la Finca Experimental La Higuera (CSIC) en Toledo los usos y manejos del suelo corresponden a los de las explotaciones de agricultura extensiva mediterráneas.

En la última década, se han publicado diferentes trabajos que incluyen exhaustivas recopilaciones bibliográficas de los estudios sobre erosión realizados en diferentes regiones españolas, dedicándose algunos de ellos exclusivamente a la erosión en suelos agrícolas. Por ejemplo, *“La erosión hídrica del suelo en el territorio valenciano. El estado de la cuestión a través de la bibliografía”* (Cerdà, 2001), *“La erosión en la región de Murcia”* (Romero Díaz, 2002), *“Gestión agrícola y erosión del suelo en la Cuenca del Ebro: el estado de la cuestión”* (Lasanta Martínez, 2003) o *“La erosión hídrica en suelos agrícolas en Galicia”* (Taboada-Castro et al., 2010).

Por otro lado, destaca el capítulo *“Spain”* (Solé Benet, 2006) de la publicación *“Soil erosion in Europe”* (Boardman y Poesen, 2006) y los trabajos *“La erosión del suelo en España”* (García Ruiz y López Bermúdez, 2009) y *“Erosión y degradación del suelo agrícola en España”* (Cerdà, 2008), en los que se realizan profundas revisiones de los trabajos llevados a cabo en el campo de la erosión en España.

2.6. Importancia de los eventos de precipitación extrema sobre la erosión del suelo

El estudio de los eventos extremos es un aspecto muy tratado en geomorfología e hidrología para identificar su frecuencia y su magnitud a través de los periodos de retorno (Ahnert, 1987; De Ploey et al., 1991; Lewis, 1992) ya que parece claro que el impacto ecológico y socioeconómico del clima se siente principalmente por los sucesos extremos. Además, son fundamentales a su vez en el estudio del cambio del clima, concepto tan manejado en la actualidad, ya que la alteración de su frecuencia puede estar oculta en variaciones mínimas de promedios. Más aún, los modelos actualmente disponibles para evaluar las consecuencias del cambio climático predicen un incremento significativo tanto en la irregularidad de la distribución de las precipitaciones como en la intensidad de los episodios extremos (ver, por ejemplo, Christensen y Christensen, 2003; PRUDENCE -Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects (2007); informe final del IPCC, 2008).

Todo suceso que se aleja del promedio es por definición menos probable que ocurra. En ocasiones, el concepto de “menos probable” puede ser sustituido por “suceso extremo” y supone la superación de un umbral (Schumm, 1980; Wigley, 1985). Inicialmente se puede afirmar que lo que se denomina suceso extremo en una región puede ser absolutamente normal en otra, por tanto los valores umbral deben ser determinados para cada lugar concreto de estudio. La Agencia Estatal de Meteorología considera una lluvia extrema a una acumulación de agua superior a 60 mm en una hora. Xie et al. (2005) reducen este umbral a los 50 mm en una hora.

Sin embargo, para Viles y Goudie (2003) el efecto de los sucesos climáticos no depende tanto de su magnitud y frecuencia sino de su agregación (no-acumulación) en el tiempo, que está controlada por la variabilidad del clima. Por ello en los sistemas mediterráneos, sometidos a una variabilidad del clima intrínsecamente alta, y bajo la perspectiva del cambio del clima, el uso de los valores promedio de la precipitación para evaluar cualquier proceso de los sistemas naturales acusa los problemas que derivan de la variabilidad temporal de la lluvia.

Las precipitaciones del tipo mediterráneo se caracterizan por su escasez, su torrencialidad y su extrema variabilidad espacial y temporal (Sumner et al., 1993; Quereda, 1994; Romero et al., 1998, 1999) que conjunta o aisladamente se solapan en el tiempo con periodos secos y definen el fenómeno de la aridez. El grado de la concentración de la precipitación anual es sumamente elevado en estos ambientes y no es raro que un simple evento de lluvia pueda alcanzar valores comparables a los totales mensuales, de tal manera que los valores estacionales pueden ocultar realmente la influencia de un corto número de días de lluvia (Delitala et al., 2000). En este sentido, los trabajos de González Hidalgo et al., (2007 y 2009) recogen una extensa recopilación bibliográfica sobre estudios que muestran la gran concentración temporal del fenómeno erosivo, asociado a un número escaso de eventos de precipitación al año.

Diversos grupos de investigación internacionales han puesto de manifiesto el papel geomorfológico predominante que juegan los episodios extremos de precipitación en regiones de clima mediterráneo (ver, por ejemplo, Thornes, 1976; Poessen y Hooke, 1997; Quiquerez et al., 2008; Capra et al., 2009). Existe un buen número de trabajos realizados en Europa y Estados Unidos que indican que más del 50% de las pérdidas totales de suelo por erosión hídrica correspondieron a la formación de regueros y cárcavas efímeras en episodios extremos de precipitación (Lafren, 1985; Grissinger y Murphey, 1989; Bradford y Piest, 1980), aunque existen estudios que aun elevan más dichos porcentajes, como el trabajo de Govers y Poesen (1988) en Bélgica en el que dichos valores se elevan hasta el 78% o el de Osborn y Simanton (1989) en Arizona donde se llegó a superar el 80%. Poesen y Hooke (1997) llevaron a cabo un estudio en la Península Ibérica, en Almería y Sudeste de Portugal, en condiciones ambientales mediterráneas, en el cual determinaron que las pérdidas de suelo producidas por erosión en cárcavas efímeras superaban el 80% de las pérdidas totales estimadas.

Grupos de investigación españoles también han revelado la importancia que tienen los eventos erosivos extremos en la erosión de los suelos por flujos concentrados (por ej. en Solé Benet, 2006; García-Ruiz y López Bermúdez, 2009; García Ruiz, 2010). No existen muchos estudios al respecto, sin embargo, los valores publicados son muy reveladores en este sentido. En Castilla-La Mancha, Alcázar (2013) observó que las tasas de erosión medidas mediante parcelas de erosión tipo USLE a lo largo de 17 campañas agrícolas (1993-1994 a 2009-2010) fueron de $3.37 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, mientras que, dentro de ese mismo periodo, un único evento de precipitación con 70 mm, el 25 de agosto de 1995, produjo pérdidas de suelo entre 119 y 755 Mg ha^{-1} en campos de cultivo que se encontraban en barbecho blanco (De Alba, 1998). Considerando un periodo de retorno de 9 años para episodios de lluvia similares en el área de estudio, se obtuvo una tasa anual media equivalente de $39 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Es decir, un único evento de precipitación produjo en torno a 12 veces el volumen de pérdida de suelo anual en dicha zona de estudio. Años antes,

Marqués (1991) encontró en campos de cultivo procesos de erosión extremos tras una tormenta en septiembre de 1983, cuya cuantificación reveló una pérdida de 16.7 Mg ha^{-1} de suelo, mientras que las mediciones entre 1983 y 1985 en esos mismos campos arrojaron valores de 29.9 Mg ha^{-1} . Es decir, más del 55% de las pérdidas de suelo producidas durante 3 años se concentraron en un único episodio según la autora. En campos de cultivo en Galicia, Rodríguez Martínez-Conde et al. (1996) encuentran en parcelas experimentales que entre el 48 y el 56 % de las pérdidas de suelo respectivamente se produjeron en un solo episodio de 51 mm de precipitación acumulada. Martínez Casanovas et al., (2002) en sus estudios de erosión en viñedos en Cataluña, aporta información sobre un evento ocurrido en Junio de 2000 en el que se registraron 215 mm durante un fuerte chaparrón. Prácticamente toda la precipitación, 205 de los 215 mm se concentraron en 135 minutos, con intensidades en 30 minutos de más de 170 mm h^{-1} . La erosividad del episodio fue similar a la precipitación de una década ($11.756 \text{ MJ}^{-2} \text{ mm h}^{-1}$). Ello explica los más de 200 Mg ha^{-1} de suelo de viñedo que fueron erosionados en un sólo día. En España, la bibliografía recoge también diversas publicaciones referidas a zonas de montaña con regímenes pluviométricos de subhúmedos a húmedos, como son entre otros los trabajos de Martín Bono y Puigdefábregas (1983), Pérez Cueva y Calvo (1984), Gallart y Clotet (1988) (en De Alba, 1998). Dentro de este grupo se incluyen también los estudios que analizaron los efectos del episodio catastrófico de 1996 del Valle de Arás en Biescas (Huesca) (ver, por ejemplo, García Ruiz et al. (1997), Gutiérrez et al. (1998a), Gutiérrez et al. (1998b) y Benito et al. (1998).

Estos datos revelan que la influencia de los eventos de precipitación extrema sobre las tasas de erosión hídrica anuales es extremadamente alta y que, debido a la influencia del cambio climático, cada vez van a tener más peso sobre la erosión de los suelos agrícolas durante el transcurso del próximo siglo. Además, en muchos casos, la falta de correspondencia entre los valores de concentración de lluvia diaria y los valores de su tendencia dificulta el uso de modelos paramétricos, lo que resalta la importancia de la obtención de datos reales de campo para la evaluación del fenómeno erosivo.

2.7. La Política Agraria Común (PAC) y la conservación del suelo: el barbecho blanco y el laboreo en contorno

La Política Agrícola Común (PAC) es una de las políticas más importantes y uno de los elementos esenciales del sistema institucional de la Unión Europea (UE). La PAC gestiona las subvenciones que se otorgan a los agricultores y ganaderos de los estados miembros y en la actualidad una de las líneas prioritarias de actuación que respaldan estas subvenciones es la protección del medio ambiente.

El origen de la PAC se remonta a los años 50 del siglo pasado, en una Europa occidental cuya población estaba marcada por los años de guerra y en la que la agricultura había quedado paralizada y el abastecimiento de alimentos no podía garantizarse. El objetivo central de esta primera etapa de la PAC fue fomentar la mejora de la productividad agrícola. En estos primeros años el volumen de producción estaba ligada directamente con la ayuda recibida por el productor, de forma que los consumidores dispusieran de un suministro estable de alimentos a precios asequibles, y garantizar que Europa disponía de un sector agrícola viable.

A partir de los años 80, una vez cumplido aquel objetivo inicial, y analizados los resultados y consecuencias de la aplicación de la PAC en sus primeros años de puesta en marcha, comienza un periodo de sucesivas reformas, hasta seis (1988, 1992, 1999, 2003, 2009 y 2013). En estas reformas se observa que las cuestiones ambientales relacionadas con la agricultura han ido tomando cada vez mayor relevancia y las distintas medidas que se han ido estableciendo han estado encaminadas a la conservación de los recursos naturales y a la sostenibilidad

medioambiental de la agricultura, frente al objetivo inicial del incremento de la productividad agrícola. Así pues, nos encontramos actualmente con un reglamento que ha roto la relación entre los pagos y la producción y cuenta con la protección del medio ambiente como uno de sus objetivos principales. Para alcanzar este objetivo medioambiental, la PAC ha incorporado los conceptos de condicionalidad y los programas y ayudas agroambientales, teniendo los agricultores que cumplir una serie de requisitos básicos en materia, entre otras, de medio ambiente y fomentando los métodos de producción respetuosos con el medio natural.

Los Estados miembros deben transponer a sus respectivas legislaciones nacionales los reglamentos provenientes desde las instituciones europeas, diseñando sus propias normas y medidas, adaptadas a sus condiciones agroambientales concretas.

En el caso de España, ya desde los primeros Reales Decretos derivados de los Reglamentos Europeos acerca de la PAC, aparecen referencias que vinculan el barbecho blanco y el laboreo en contorno como prácticas beneficiosas para el suelo y de obligado cumplimiento para poder optar al cobro de las subvenciones correspondientes. Por ello, se incluye en el presente trabajo una revisión de las principales reformas de la PAC relacionadas con la agricultura y la conservación del suelo, especialmente en lo referente a los cultivos herbáceos, y dentro de estas, las medidas que introducen la obligatoriedad del barbecho blanco y del laboreo en contorno.

Durante el periodo comprendido entre 1970 y 1980, debido al espíritu inicial de la PAC de aumentar la producción y a la tecnificación y modernización del sector agrícola, se produjo un gran aumento de los principales productos agrarios en comparación a su consumo, generándose una gran cantidad de excedentes de producción. Para tratar de restablecer el equilibrio en los mercados, a mediados de la década de los ochenta se inició la primera de las sucesivas reformas de la PAC. Como medida para reducir los excedentes de producción, en 1988 la normativa comunitaria europea establece un régimen de ayudas destinado a fomentar la retirada de la producción de tierras de cultivos herbáceos (Reglamento (CE) nº 1094/1988).

En España, el Real Decreto 1435/1988 desarrolló este Reglamento, regulando el régimen de ayudas y estipulando las medidas destinadas a conservar las buenas condiciones agronómicas de estas tierras retiradas de la producción, de obligado cumplimiento para los beneficiarios de estas ayudas. En su artículo 5, dicho Real Decreto indica que *“las tierras dejadas de cultivar para la producción de cultivos herbáceos se podrán destinar a: repoblación forestal, barbecho con posibilidad de rotación o fines no agrarios, estando el beneficiario de las ayudas obligado a continuar realizando las labores culturales adecuadas para mantener las superficies retiradas de la producción de cultivos herbáceos en buenas condiciones agronómicas, protegiendo el medio ambiente y los recursos naturales”*. A continuación, en el artículo 6, se estipula las condiciones de barbecho de la siguiente manera: *“cuando las tierras se dejen en barbecho, el agricultor está obligado a mantener o crear, con arreglo a las condiciones de suelo y clima, una cobertura vegetal apropiada, especialmente cuando se trate de prevenir la erosión y lavado de nitratos. La cubierta vegetal podrá dejarse sobre el suelo durante todo el año o enterrarse....”* y a *“efectuar los trabajos mecánicos necesarios para la conservación del suelo, en particular los orientados a conservar la reserva hídrica y los de lucha contra las malas hierbas”*.

Esta norma supuso una retirada de $91.6 \cdot 10^3$ ha entre 1989 y 1992, que se destinaron fundamentalmente a barbechos (cerca del 80%) (Sancho Comins et al., 1994). La superficie total dedicada a barbecho en España en el quinquenio 1989-1992 fue de 4 millones de ha, que suponen aproximadamente el 23% de la superficie total dedicada al cultivo de secano en este periodo.

Esta línea se continuó con la reforma de 1992. En este nuevo modelo, el programa de retirada de tierras continuo teniendo gran importancia, ya que estas ayudas directas estaban así mismo condicionadas a la obligación de mantener un porcentaje de tierras retiradas de la producción.

Sin embargo, el cobro de estos pagos no estaba sujeto al cumplimiento de ninguna norma de tipo medioambiental.

En España, la Orden de 18 de diciembre de 1992 (BOE nº 307 de 23 de diciembre de 1992) desarrolló el reglamento correspondiente y, dado que en los secanos españoles era tradición realizar barbecho en las tierras de cultivo, se elaboró la Orden de 29 de diciembre de 1992 (BOE nº 3 de 4 de enero de 1993), que regulaba esta práctica determinando los índices de barbecho comarcal para las tierras de cultivos herbáceos en las distintas comarcas agrarias de secano, con los que se fijaba el porcentaje de la explotaciones en los que aplicar la retirada de tierras.

En dicha Orden se justificaba la aplicación del barbecho por ser *“una práctica cultural tradicional del cultivo de secano, impuesta por la necesidad de incrementar las reservas hídricas y la fertilidad del suelo”* y se afirmaba que su aplicación *“produce efectos positivos de tipo medioambiental, de protección de la erosión y control de plagas entre otros”*. Concluyendo que *“parece conveniente regular la práctica del barbecho blanco a efecto de la instrumentación de los pagos compensatorios por hectárea”*, y que *“se considera como una práctica tradicional de cultivo en secano el mantenimiento de un coeficiente de barbecho blanco a nivel comarcal respecto de la media de la superficie de cultivos herbáceos”*.

Por todo ello, la Orden dispone que *“los productores de cultivos herbáceos de secano que pretendan solicitar pagos compensatorios deberán dejar de barbecho blanco una superficie acorde con las prácticas tradicionales de la comarca en la que radique su explotación”*.

Posteriormente, en la Orden de 20 de diciembre de 1993 (BOE nº 306 de 23 de diciembre de 1993), se estipula en un 20% de la superficie cultivada el porcentaje de tierras de retirada para la opción de forma no rotatoria o fija (5 años) y se establece para la opción de retirada rotatoria dos modalidades de barbecho en función de las características climáticas de la zona: *“en la región semiárida de España, deberán realizarse las operaciones de barbecho, bien mediante el sistema del mínimo laboreo, bien mediante los sistemas tradicionales de cultivo, con objeto de minimizar los riesgos de erosión, aparición de accidentes, malas hierbas, plagas y enfermedades; conservar y en su caso, mejorar la capacidad productiva del suelo y favorecer el incremento de la biodiversidad”*. *“En las tierras que pertenezcan a explotaciones con características propias de la región húmeda de España o de regadío podrá mantenerse una cubierta vegetal adecuada, tanto espontánea como cultivada, y para ello se realizarán prácticas culturales adecuadas a cada zona, incluyendo las aplicaciones de herbicidas autorizados sin efecto residual y de baja peligrosidad”*.

Por otro lado, las primeras referencias que vinculan el laboreo en contorno como una práctica beneficiosa para el suelo y de obligado cumplimiento aparecen por primera vez en la legislación española en 1995. Así, en el Real Decreto 51/1995, se establecen ayudas para fomentar *“métodos de producción agraria compatibles con la conservación del espacio natural”*. En una de estas ayudas, destinada al *“fomento de la agricultura extensiva”*, los beneficiarios se comprometen a *“realizar una labor poco profunda en el sentido de las curvas de nivel”*. Posteriormente, en el Real Decreto 4/2001, se determinan una serie de medidas denominadas *“buenas prácticas agrarias”* con el objetivo, entre otros, de *“luchar contra la erosión y mejorar la estructura y fertilidad de los suelos agrícolas”*. Una de estas buenas prácticas, que deben respetarse por quienes se acojan a determinadas ayudas, es la *“prohibición del laboreo convencional a favor de la pendiente”*. Dicha prohibición se mantiene en las normativas posteriores, Reales Decretos 708/2002 y 1322/2002, en los que se establecen los *“requisitos*

agroambientales a cuyo cumplimiento se supeditará el pago íntegro de las ayudas directas en el marco de la PAC". En este documento se establece como *"requisito agroambiental para las actividades agrícolas"* *"no labrar la tierra en dirección de la pendiente"*.

Más tarde, el concepto *"condicionalidad"* surgió en la reforma de la PAC del año 2003. El Reglamento (CE) nº 1782/2003 introduce la obligación de los agricultores y ganaderos que reciben pagos directos de cumplir con las buenas prácticas agrarias y medioambientales enunciadas en su anexo IV. En España, se publica el Real Decreto 2352/2004 sobre la aplicación de la condicionalidad donde se establecen tres objetivos: conservación del suelo, garantizar un mantenimiento mínimo de las superficies agrícolas y evitar el deterioro de los hábitats. Dentro del objetivo de conservación del suelo, en el apartado *"condiciones exigibles para evitar la erosión del suelo"* se especifican una serie de normas relativas a la dirección de la labranza. En el caso de los cultivos herbáceos en la norma se especifica la condición de *"no labrar la tierra en la dirección de la pendiente, cuando la pendiente media exceda el 10%"*. En 2009 se aborda una nueva revisión de la PAC (Reglamento CE nº 73/2009), reforzando el concepto de condicionalidad. El Real Decreto 486/2009 (BOE de 17 de abril de 2009) recoge las nuevas condiciones agrarias y medioambientales que deben cumplir los agricultores a partir de abril de ese año. Al igual que en el anterior Reglamento, en el apartado *"normas exigibles para evitar la erosión"* se mantiene la condición de que *"en las superficies que se destinen a cultivos herbáceos, no deberá labrarse con volteo de la tierra en la dirección de la máxima pendiente cuando, en los recintos cultivados, la pendiente media exceda del 10 por ciento, salvo que la pendiente real del recinto esté compensada mediante terrazas o bancales."* Finalmente, en la última reforma de la PAC, del año 2013 (Reglamento CE nº 1307/2013 de 17 de diciembre) cuya transposición a la legislación española se aborda en los Reales Decretos 1075/2014 y 1076/2014, de 20 de diciembre, no se aborda, ni deroga, ninguno de los aspectos relativos a la condicionalidad, manteniéndose en vigor los establecidos en el año 2009. Si bien se hace hincapié en las bondades del laboreo según las curvas de nivel en el Anexo IV, apartado A *"Actividades posibles a realizar en tierras de cultivo o cultivos permanentes"* donde se cita la posibilidad de *"asurcar (según curvas de nivel que evita la erosión y favorece la penetración del agua en el suelo)"*.

2.7.1. El barbecho blanco, una práctica habitual en la agricultura extensiva de secano en España apuntalada por la legislación

La región mediterránea, y España particularmente, presenta unas condiciones naturales y culturales que favorecen la erosión de los suelos. Por un lado, como ya se ha citado antes, está fuertemente sujeta a tormentas muy erosivas, cuya frecuencia puede aumentar con los cambios climáticos globales (EEA, 2004). Además, con el fin de evitar la competencia por el agua entre las especies vegetales en los campos de cultivo y conservarla, los campos agrícolas son a menudo mantenidos artificialmente sin cobertura vegetal, en barbecho blanco, resultando grandes áreas expuestas al impacto de las precipitaciones (Tropeano, 1984; Ramos y Martínez-Casasnovas, 2006).

El barbecho blanco es una práctica de manejo tradicional, por la cual la tierra se deja desnuda, sin sembrar durante uno o varios ciclos vegetativos, que surge en el entorno agrícola mediterráneo a raíz de la escasez y variabilidad de sus precipitaciones, como una estrategia para incrementar el almacenamiento de agua en el perfil del suelo para el cultivo siguiente.

La estrategia para conservar la máxima cantidad de agua en el perfil del suelo se basa en el mantenimiento del suelo libre de vegetación adventicia mediante el laboreo continuo, lo que reduce la pérdida de humedad por transpiración. Como parte del laboreo continuo, las labores superficiales de verano rompen la continuidad capilar de la capa superficial del suelo, reduciéndose con ello la evaporación. Además, a partir del laboreo continuo se consigue la

formación de una capa superficial mullida con abundantes macroporos que aumenta la infiltración del agua de lluvia ante las precipitaciones.

Sin embargo, numerosos autores han discutido la eficiencia de esta práctica, especialmente de su capacidad para almacenar el agua de lluvia, concluyendo que la conservación del agua durante el barbecho depende del tipo de suelo, del sistema de laboreo, de la cantidad y distribución de la lluvia y la capacidad y la evapotranspiración (ver, por ejemplo, López Bellido, 2002 o Lampurlanés et al., 2002), y que la principal ventaja del barbecho es el control de las malas hierbas y de enfermedades asociadas al cereal, más que el suministro adicional de agua o nitrógeno (Loomis y Connor, 1992).

A los mayores o menores beneficios que reporta la práctica del barbecho se contraponen un importante perjuicio: el mantenimiento del suelo sin ningún tipo de cubierta vegetal, desnudo, lo que lo hace mucho más frágil frente a la precipitación.

Se ha podido establecer para una gran amplitud de escalas espaciales, tipos de suelo, climas y vegetación, que las producciones de escorrentía y sedimentos disminuyen conforme aumenta el porcentaje de recubrimiento del suelo (ver, por ejemplo, Elwel y Stocking, 1976; De Ploey, 1989; Francis y Thornes, 1990; Roxo, 1994; Bochet et al., 1998; Durán Zuazo et al. 2006), ajustándose normalmente la relación entre la cobertura vegetal y la tasa de erosión hídrica a una curva exponencial negativa (ver, por ejemplo, Elwel y Stocking, 1976; Lee y Skogerboe, 1985 o Francis y Thornes, 1990).

El recubrimiento ejerce un efecto protector del suelo frente a la acción directa de la lluvia mediante dos mecanismos principales: a) La intercepción de las gotas de lluvia, constituyendo una barrera física que disipa su energía cinética y evita la destrucción de agregados de suelo, la movilización de las partículas por salpicadura y el sellado de los poros superficiales del suelo (Hudson, 1973; Brandt y Thornes, 1987; Francis y Thornes, 1990; Dunne et al., 1991); b) La transformación de las características de la superficie del suelo, como el aumento de la rugosidad, de la estabilidad estructural de los agregados, la reducción de la compactación y de la formación de costras superficiales, etc., que a su vez modifican su respuesta hidrológica (tasas de infiltración y escorrentía, concentración y velocidad del flujo superficial, etc.).

Diversos trabajos han analizado la relación entre la cobertura vegetal y el grado de protección que ésta ejerce frente a la erosión, mostrando la existencia de un valor umbral de cobertura vegetal, a partir del cual la protección ya no aumenta de manera proporcional al aumento del grado de recubrimiento. Existen multitud de trabajos con diferentes valores umbral que, sin embargo, son tan dependientes de la escala a la que se realizaron las observaciones que resulta difícil establecer este punto de inflexión. Aun así, sirva de referencia el trabajo de Govers (1991) que concluyó que además de la topografía, la cubierta vegetal era el factor más importante que afectaba a la variación de la tasa de erosión, ya que observó una reducción del 30% en las tasas de erosión por regueros con una cubierta de entre el 20 y el 40%, e incluso no-erosión si la cubierta superaba el 40%. También son destacables en este aspecto los trabajos de Molinillo et al. (1997) y Sauer y Ries (2008), que determinaron que, para ambientes mediterráneos, con un 60% de cobertura vegetal se obtiene una protección adecuada, aumentando rápidamente la escorrentía y la erosión para valores inferiores. Más recientemente, en Alcázar (2013), a partir de un estudio sobre parcelas experimentales tipo USLE, se sitúa un umbral del 25% de cobertura vegetal a partir del cual la producción de sedimentos se incrementa de forma significativa. Sin embargo, en este estudio los resultados reflejaron que en todos los escenarios evaluados esta relación fue lineal y negativa.

2.7.2. El laboreo en contorno como estrategia para la conservación del suelo

El laboreo en contorno o laboreo a nivel, es decir, el realizado según una dirección próxima a la de las curvas de nivel, ha sido considerado como la más elemental de las prácticas de conservación y casi de obligada aplicación; ver por ejemplo en Goldman et al. (1986) y en castellano algunas publicaciones clásicas son las del Servicio de Conservación de Suelos del Ministerio de Agricultura (Roquero de Laburu, 1954, Tamés, 1957) y otras como Mateo Box (1995), Giraldez (1998), etc., que concluyó siendo de obligada aplicación según la legislación anteriormente expuesta.

La disposición de los surcos de labor más o menos perpendiculares a la dirección de la pendiente supone la interrupción de los flujos de escorrentía ladera abajo, evitando, por lo tanto, sus efectos erosivos (Rauws, et al., 1980; Unger et al., 1991). Por el contrario, el laboreo en la dirección de la pendiente favorece el drenaje de agua a lo largo de los surcos de labor, con lo que el caudal y la velocidad de la escorrentía y, con ello, la energía del flujo tienden a aumentar ladera abajo, lo que conlleva la posibilidad de arranque y transporte de material del suelo (Horton, 1945; Bryan, 1987).

Son los modelos de determinación de la erosión USLE (Wischmeier y Smith, 1978) y, posteriormente, la revisión de la misma, RUSLE (Renard et al., 1997) los que afianzan el concepto de laboreo en contorno como una de las buenas prácticas agrícolas que contribuyen a la conservación del suelo. No en vano, los modelos USLE/RUSLE son los más ampliamente utilizados para la medición de la erosión hídrica a escala nacional y europea en la actualidad (Eckelmann et al., 2006 en Martín Fernández y Martínez Núñez, 2011) y lleva siendo así prácticamente desde que este modelo empírico se publicó. Cabe recordar en este punto la elaboración en España de los Mapas de Estados Erosivos realizados por el ICONA y finalizados en 1991 (MOPT, 1992), en los que se estimaron las tasas potenciales de pérdida de suelo mediante la aplicación de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo, USLE. La PAC y, por consiguiente, la legislación española asume el laboreo en contorno como una práctica de conservación del suelo teniendo como referencia, evidentemente, los modelos USLE/RUSLE.

En general, está ampliamente aceptado, basada esta aceptación en los citados modelos, que para episodios de lluvia en los que se generan pequeños caudales de escorrentía, el laboreo en contorno es extraordinariamente efectivo, tanto para el control de la erosión, como para el control de la escorrentía, si bien la erosión se ve más afectada que la escorrentía. Sin embargo, en episodios de elevada precipitación, la eficacia del laboreo en contorno genera más controversia. Los propios Wischmeier y Smith (1978) afirmaron que la labranza a nivel produce la máxima protección en episodios de moderada y baja erosividad, mientras que, dicha protección, se ve fuertemente reducida en episodios de mayor erosividad. En estos episodios, el volumen de agua de escorrentía acumulada en un surco puede llegar a desbordarse iniciando de esta manera un proceso de reguercización o acarcavamiento de la ladera agrícola. Contra esta afirmación general, existen algunas referencias en la literatura, no demasiadas, que cuestionan la eficacia de la aplicación del laboreo en contorno como práctica para combatir la erosión del suelo (Laflen, 1985; De Alba, 1998, 2011). De hecho, estos últimos episodios, los de mayor erosividad, juegan un papel diferenciador en condiciones de secano mediterráneo, como ya se indicó con anterioridad (ver apartado 2.6.).

La aplicación generalizada de los modelos USLE/RUSLE implica que el riesgo de erosión actual de los suelos está determinado mayoritariamente por las decisiones sobre los manejos agrícolas adoptadas a escala de parcela (De Alba, Cost 634, 2005). Cabe repetir en este apartado que numerosos autores (ver, por ejemplo, Govers, 1991; Risse et al., 1993) han puesto de manifiesto que la aplicación de modelos sin la correspondiente calibración a las condiciones agroambientales reales da lugar a predicciones de pérdida de suelo con fuertes desviaciones

respecto a los valores medidos con métodos de campo. Es ilusorio pensar que el papel de la falta de mediciones puede ser asumido por la aplicación de tecnología para predecir la erosión. Las mediciones son necesarias para desarrollar, calibrar y validar dicha tecnología. *“La aplicación a ciegas de modelos empíricos a situaciones ilimitadas no da predicciones reales de pérdida de suelo”* (Albadalejo y Stocking, 1989).

A este respecto, poco trabajo de investigación se ha hecho sobre la comparación de los impactos del laboreo en contorno y a favor de la máxima pendiente sobre la generación de escorrentía y por ende de sedimentos en situaciones reales de cultivo a escala de ladera. Si que existe una extensa literatura en este sentido a partir de simulaciones de lluvia, pero esta presenta fuertes limitaciones de partida, ya que se practica sobre parcelas de control que impiden una buena comparación entre ambos métodos debido a las limitaciones espaciales que ofrece el método.

A estos hechos hay que añadir la importante cantidad económica que se destina desde la UE vinculada al cumplimiento de las buenas condiciones agrarias y medioambientales (según los datos del Fondo Español de Garantía Agraria (www.fega.es), durante el periodo 2001-2007, se han destinado un promedio de 1800 millones de euros anuales a la subvención de los cultivos herbáceos en España, lo cual revela el enorme interés que supone contrastar la eficacia de la labranza a nivel frente al laboreo a favor de la máxima pendiente como práctica de conservación en el secano mediterráneo.

Por todo ello, el modelo de toma de decisiones respecto a los modelos de gestión del territorio que consideren como premisa la sostenibilidad de la calidad y cantidad de la productividad biológica del suelo, requiere del conocimiento de las tasa reales (actuales) de la degradación por erosión; así como de modelos predictivos que permitan evaluar la respuesta de las distintas alternativas de uso y sistema de manejo del suelo para las características específicas del territorio.

2.8. Objetivos

El objetivo final de esta Tesis es evaluar la eficacia del laboreo en contorno como práctica de conservación del suelo en las condiciones ambientales mediterráneas de la región central de España, práctica promovida en diferentes normativas derivadas de la Política Agraria Común europea (PAC). Para ello, se propone determinar los efectos de diferentes direcciones de laboreo sobre laderas agrícolas de secano mediterráneo (laboreo en contorno, laboreo oblicuo respecto a la dirección de la máxima pendiente y laboreo a favor de la máxima pendiente) en relación con sus respuestas hidrológica y erosiva, cuantificando y analizando las tasas de erosión registradas asociadas a cada una de las situaciones. Con dicho objetivo, se ha focalizado el estudio sobre los episodios erosivos extremos que se desarrollan a escala de ladera, aquellos asociados al desarrollo de regueros y/o cárcavas efímeras, entendiendo que estas formas erosivas producen los porcentajes mayores de la erosión total, y que, a escala de ladera, al reproducirse el funcionamiento hidrológico natural sin ningún tipo de limitación, los resultados que se obtienen son más fácilmente extrapolables. En este contexto, los episodios erosivos extremos serán considerados claves a la hora de evaluar la eficacia de las distintas alternativas de prácticas agronómicas y planes de conservación del suelo.

A su vez, se plantea elaborar protocolos alternativos para la toma de datos en campo, los cuales permitan optimizar la precisión de los datos obtenidos y la dedicación temporal necesaria para su aplicación.

Para lograr alcanzar estos objetivos generales se han abordado los siguientes objetivos específicos, que se muestran en forma de esquema en la figura 2.2, y que aquí se exponen en el orden en que se han abordado en el desarrollo del trabajo:

Describir y cuantificar la erosión por regueros y/o cárcavas efímeras que ocurre en laderas agrícolas con cultivos herbáceos, de viñedo y olivar en las condiciones ambientales mediterráneas de la región central de España, relacionando la erosión producida con los episodios de precipitación desencadenantes de la misma. A su vez, caracterizar los suelos erosionados (determinación de sus características físico-químicas, topográficas, etc.), prestando especial atención a las diferentes direcciones de laboreo presentes sobre las laderas erosionadas y su relación con las diferentes morfologías erosivas formadas por los regueros y/o cárcavas efímeras presentes.

Desarrollar alternativas al Método de la Nube de Puntos para la caracterización de las redes dendríticas de regueros en campo. Para ello, serán estudiadas hasta cuatro alternativas, utilizando como referencia el método de los transectos de control. Se analizará la eficiencia temporal en la aplicación en campo de estas alternativas y su precisión en los resultados obtenidos respecto al método de referencia.

Realizar una caracterización detallada de los eventos de precipitación desencadenantes de los episodios erosivos extremos.

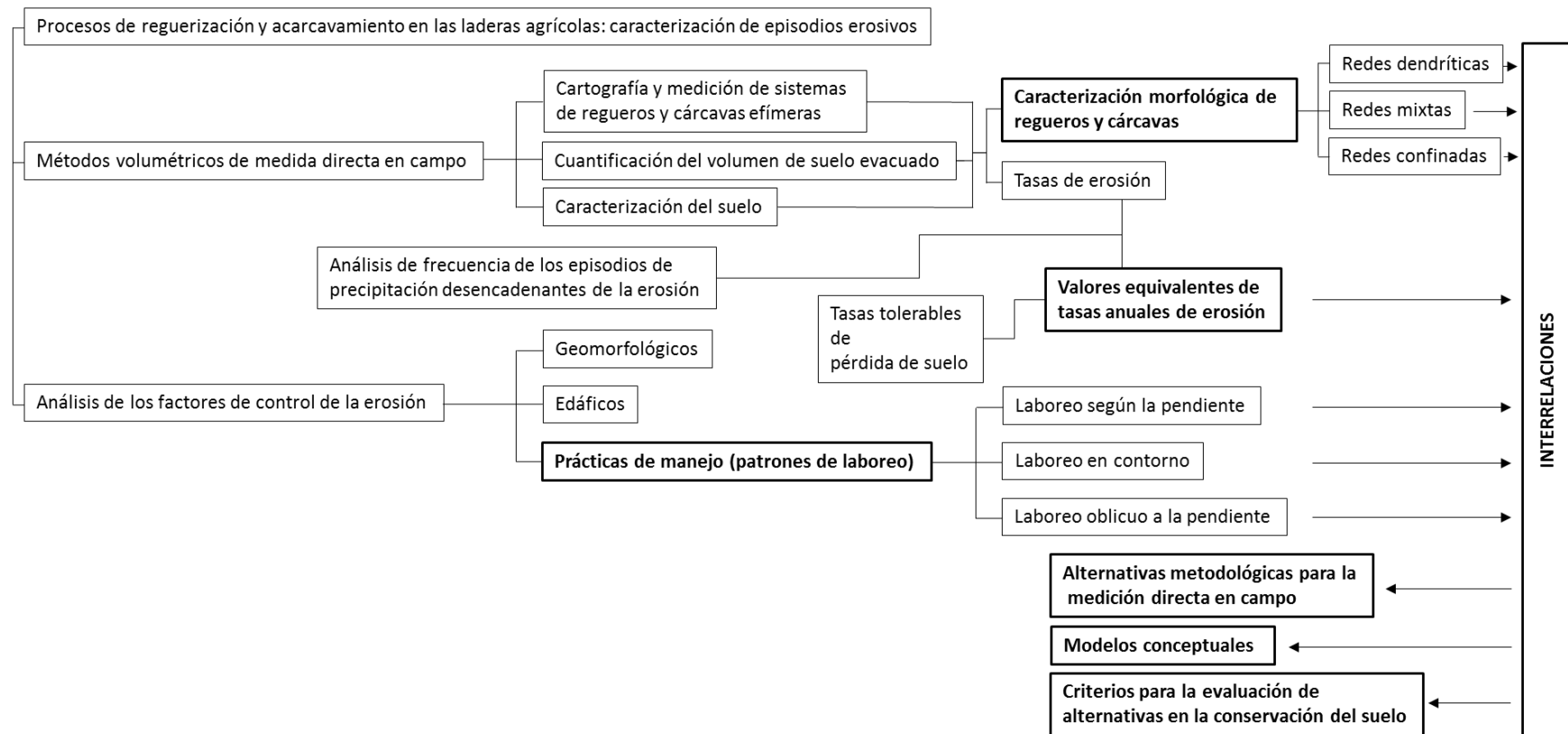
Evaluar la importancia de los diferentes eventos erosivos extremos caracterizados y cuantificados, tanto en términos de gravedad de los mismos para la conservación y/o explotación de los suelos agrícolas, como en términos de representatividad de los casos de estudio desarrollados, así como determinar la importancia relativa de los efectos de los episodios erosivos extremos frente a aquellos episodios erosivos de moderada y baja intensidad, en los cuales las pérdidas de suelo se producen ligadas a los procesos de erosión difusa.

Identificar los factores y condiciones que ejercen mayor influencia sobre la erosión por regueros y/o cárcavas efímeras. Discutir la influencia de las relaciones de la pendiente y la superficie de drenaje sobre las secciones de los canales desarrollados, como los dos elementos de la topografía que potencialmente pueden generar una mayor influencia sobre las características de la erosión desarrollada. Por otro lado, profundizar en los efectos producidos por la aplicación de diferentes patrones de laboreo (rugosidad orientada inducida por el laboreo), en contorno, según la pendiente y oblicua, sobre la susceptibilidad del suelo ante los procesos de reguerrización.

Analizar el efecto de la aplicación del laboreo en contorno, es decir, el realizado según una dirección próxima a la de las curvas de nivel, así como conocer los porqués de su consideración como una de las más elementales prácticas de conservación del suelo. Indagar en el origen de esta práctica de conservación, su evolución histórica vinculada fundamentalmente con los modelos de determinación de la erosión USLE/RUSLE y con planteamientos experimentales vinculados a las parcelas de erosión, así como en su vinculación con la Política Agraria Común (PAC).

En página siguiente: Figura 2.2: Esquema general de la investigación realizada para el estudio de los procesos de erosión hídrica por regueros y/o cárcavas efímeras.

Influencia de los patrones de laboreo sobre la respuesta erosiva durante episodios extremos de erosión
en paisajes agrícolas de secano mediterráneo



3.ÁREA DE ESTUDIO

3.1. Introducción

El presente estudio se ha desarrollado en la zona central de la Península Ibérica. En la misma se ha caracterizado y cuantificado la erosión producida sobre diferentes laderas agrícolas localizadas, de forma genérica, en tres áreas geográficas:

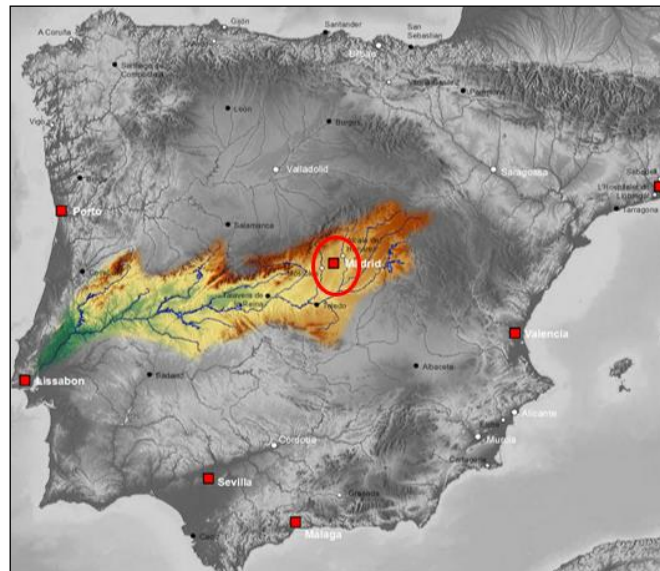
- 1- Comunidad de Madrid, donde se han estudiado hasta un total de cuatro episodios erosivos en los términos municipales de Paracuellos del Jarama, Ajalvir, Móstoles y Arroyomolinos.
- 2- Comarcas de La Mancha y Campo de Montiel (Ciudad Real, Castilla-La Mancha), donde se han estudiado hasta un total de tres episodios erosivos en los términos municipales de Villarrubia de los Ojos, Pedro Muñoz y Valdepeñas.
- 3- Comarca de Torrijos (Toledo, Castilla-La Mancha), donde fueron realizadas mediciones de rasgos de erosión en diversas fincas agrícolas de las localidades de Rieves, Cebolla, Hormigos y Santa Olalla (finca Las Zorreras). Igualmente han sido utilizados para este estudio datos obtenidos en el campo experimental sobre erosión de suelos agrícolas instalado en la Finca Experimental La Higuera, que pertenece al Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Dicha Finca Experimental se encuentra emplazada entre los términos municipales de Santa Olalla y Maqueda (Toledo).

En cada uno de los emplazamientos han sido estudiadas una o más cuencas hidrológicas de pequeño tamaño (en adelante microcuencas) sobre laderas agrícolas.

3.2. Localizaciones dentro de la Comunidad de Madrid

3.2.1. Marco fisiográfico y geológico

Las localizaciones que se sitúan en la Comunidad de Madrid están incluidas dentro de la Cuenca Hidrográfica del Tago, en su parte oriental, en el entorno de la ciudad de Madrid (figura 3.1).



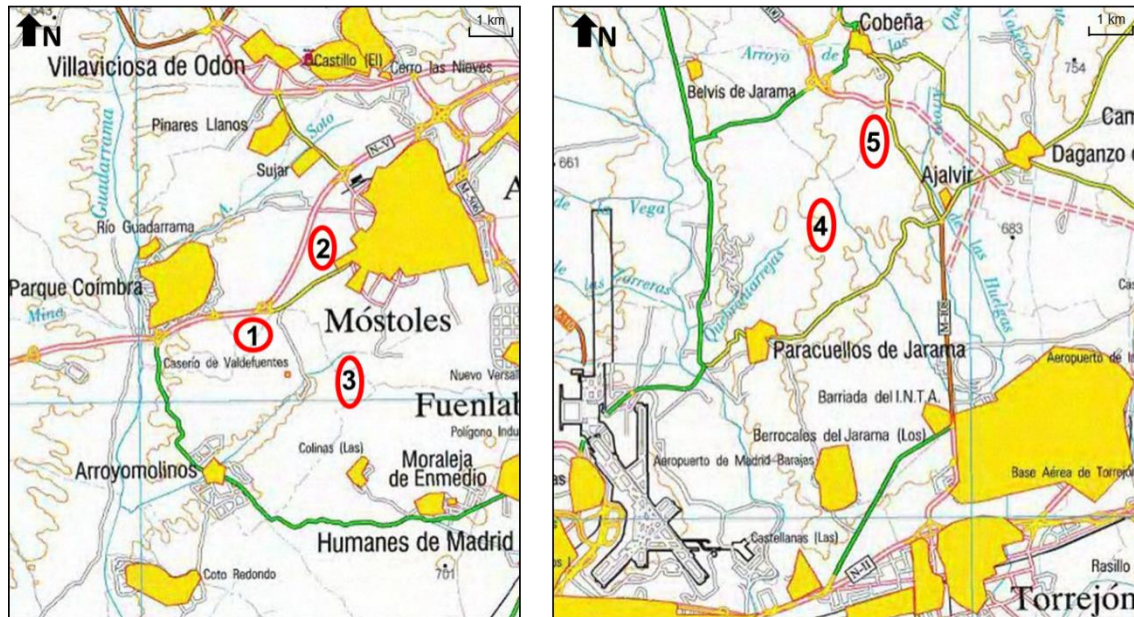


Figura 3.1: Mapa de situación de las diferentes áreas de estudio dentro de la Comunidad de Madrid. En la figura superior puede observarse la Cuenca Hidrográfica del Tajo, donde la elipse roja delimita la zona de estudio dentro de la misma. Fuente: <https://wikipedia.org> En las figuras inferiores pueden observarse las localizaciones concretas de las laderas de estudio. A la izquierda, el mapa del área de Móstoles-Arroyomolinos, al Oeste de la ciudad de Madrid, donde se localizan tres zonas diferentes de estudio: 1: Ay-1 y Ay-2; 2: Mo-1; 3: Mo-2. A la derecha, el área de Paracuellos del Jarama-Ajalvir, en las cercanías del aeropuerto de Madrid-Barajas, al Este de la capital, donde se han localizado otras dos zonas de estudio. 4: Pj-1, Pj-2, Pj-3 y Pj-4; 5: Aj-1 y Aj-2. Fuente: Visor SIG-PAC. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA).

La Cuenca Hidrográfica del Tajo se encuentra situada geográficamente en la zona central de la Península Ibérica, entre las cuencas del Duero (al Norte), Ebro y Júcar (al Este) y Guadiana (al Sur). El conjunto de la cuenca tiene, dentro de España, una superficie de 55.769 km² hasta la frontera con Portugal, que constituye su límite occidental (figura 3.1).

Como unidad geográfica está limitada al Norte por el Sistema Central, al Este por el Sistema Ibérico, al Sur, en su sector oriental, por una serie de cuencas endorreicas y en su sector occidental por los Montes de Toledo. Las principales zonas elevadas que rodean la depresión se sitúan en la Sierra de Gredos, Guadarrama, Albarracín, Serranía de Cuenca y Montes de Toledo.

La estructura tectónica mayor a la que pertenece esta cuenca hidrográfica es la denominada Fosa del Tajo, cuya extensión total es de unos 20.000 km². En el interior de la Fosa del Tajo se han diferenciado otras estructuras menores: la Cuenca de Madrid y la Depresión Intermedia, o Cuenca de Loranca.

La Cuenca de Madrid, donde se sitúa geológicamente una parte de este estudio, se trata de una cuenca intracratónica cuya constitución responde a estructuras muy antiguas, ya que debe relacionarse con el periodo de deformación del área semi-móvil celtibérica en el borde oriental del Macizo Hespérico. Esta fase de actividad abarca desde el Cretácico terminal hasta el Oligoceno (orogenia alpina), en diversos pulsos (Álvaro et al., 1979).

De forma simple, en el área de estudio pueden establecerse dos zonas bien diferenciadas: una formada por materiales detríticos poco consolidados, que en su mayoría son los rellenos de la Cuenca de Madrid, que en la actualidad se sitúan en posición topográfica más baja que la segunda zona, formada esencialmente por materiales consolidados y que forman los resaltes del paisaje, calizas de los páramos.

Desde un punto de vista sedimentológico, los materiales pertenecientes al conjunto sedimentario continental que rellenan la Cuenca de Madrid abarcan desde el Cretácico hasta los niveles pliocenos que se disponen en la parte superior de los relieves más altos dentro de la Cuenca (Junco y Calvo, 1983). Los materiales son en su mayor parte de edad miocena, al menos desde la parte más superior del Burdigaliense. Debido a que durante la mayor parte del tiempo que tardó en rellenarse, durante el Terciario, la fosa constituía una cuenca endorreica, se localizan en la parte central facies químicas (yesos) impermeables. En el Plioceno Superior, cuando la cuenca ya estaba casi colmatada, se inicia el basculamiento regional de la meseta hacia el Suroeste, lo que provoca el exorreísmo de la cuenca que, a su vez, provocó el encajamiento de la red hidrográfica del Tajo y su desagüe hacia el Atlántico (formación del sistema fluvial y depósitos fluviales asociados). En el Cuaternario, la red fluvial inicia el vaciado de la fosa del Tajo hasta el día de hoy, constituyendo el factor más importante del modelado del paisaje (memoria Mapa Geológico de España, hoja nº 581 Móstoles, IGME, 2007).

Los materiales de relleno de la Fosa del Tajo están escasamente afectados por una acción tectónica regional, y representan por tanto el relleno de la fosa posterior a las deformaciones. Estos materiales, de origen detrítico, ocupan una gran extensión y representan una sedimentación de origen mecánico en el borde del Sistema Central, constituyendo la denominada Facies Madrid (Riba, 1957). La composición petrológica de esta facies está formada fundamentalmente por arcosas feldespáticas provenientes de la erosión de los relieves graníticos y metamórficos del Sistema Central y depositada en un ambiente de sedimentación de abanicos aluviales en condiciones climáticas semiáridas. Por ello, su distribución espacial forma una orla detrítica al Sur del Sistema Central.

Las litologías detríticas que rellenan la Cuenca Sedimentaria de Madrid se pueden clasificar en tres grandes conjuntos, en función de su posición respecto a la fuente principal de sedimentos y a la granulometría de sus facies: el primer gran conjunto engloba a las facies más proximales de la cuenca, y está formado fundamentalmente por conglomerados y bloques con niveles arenosos; el segundo gran conjunto litológico engloba a las facies intermedias, y está formado por areniscas arcósicas con algunos niveles de conglomerados, arcillas y limos; finalmente, el tercer conjunto de rocas sedimentarias engloba a las facies distales de la cuenca, y está formado por arcillas y limos fundamentalmente.

En la figura 3.2 se puede ver con todo detalle la columna estratigráfica de los depósitos terciarios de la Cuenca de Madrid tomada de Alonso Zarza y Pérez Jiménez (2008). Otros trabajos de interés desde un punto de vista sedimentológico son los de Calvo et al. (1989) y Alonso-Zarza y Calvo (2002).

Mientras el relleno terciario tiene mucho espesor en la cuenca, los sedimentos cuaternarios solo aparecen en los rellenos de los ríos que atraviesan la región, resultando poco significativos.

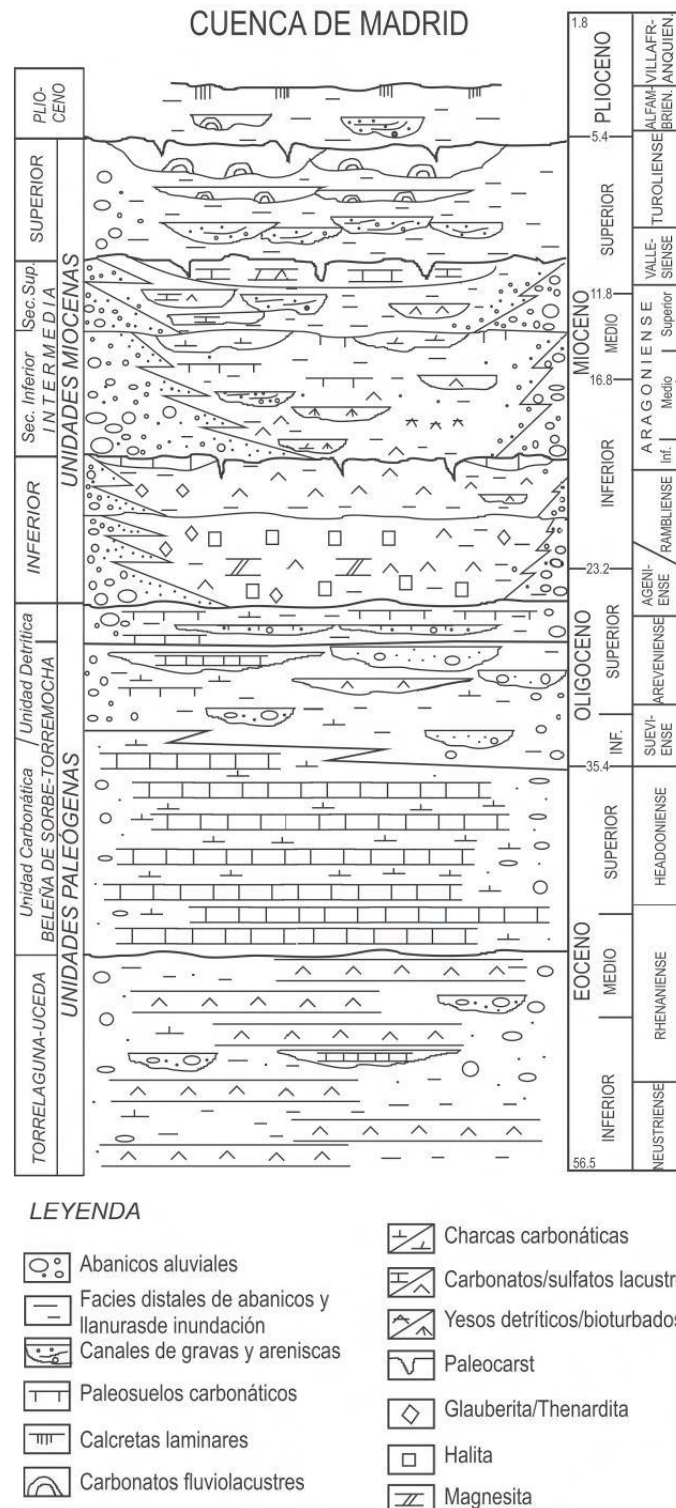


Figura 3.2: Estratigrafía de los depósitos terciarios de la Cuenca de Madrid (tomado de Alonso Zarza y Pérez Jiménez, 2008).

En la cuenca se desarrollan superficies modeladas por el encajamiento de la red fluvial cuaternaria. Este encajamiento ha generado un relieve suavemente alomado, en su mayoría, con pendientes medias entre el 5 y el 15%; sólo interrumpidas en el tercio oriental por la Sierra de Altomira que se adentra, hacia el Sur, en la Cuenca Hidrográfica del Guadiana. En dichos materiales detríticos (Facies Madrid), a su vez, existen acuíferos con aguas de buena calidad. Los acuíferos se localizan en los niveles de arenas más groseras (irregulares) situados entre las

arcosas y las arcillas. Es sobre estos materiales terciarios sobre los cuales se han desarrollado los suelos que posteriormente han dado lugar a toda la actividad agrícola cerealista característica de la zona.

3.2.2. Climatología y vegetación

Para la caracterización climática del área de estudio han sido escogidos los valores meteorológicos de la ciudad de Madrid, a modo de referencia dentro del área de estudio, ya que se encuentra aproximadamente en la zona central del mismo.

Para los análisis se ha tomado como referencia una serie de 61 años de datos de precipitación (1946-2007), y de 33 años para los valores de temperatura (1974-2007), de la estación meteorológica de Cuatro Vientos (Madrid), perteneciente a la red nacional de estaciones meteorológicas de la Agencia Estatal de Meteorología (AEMET), código 3196. Se ha seleccionado esta estación como referencia por situarse fuera de la ciudad de Madrid, considerando que las estaciones que se sitúan dentro de las ciudades se encuentran muy influidas por las condiciones urbanas, que amortiguan las oscilaciones térmicas debidas al efecto antrópico

El clima dominante en la zona de estudio, a grandes rasgos, presenta veranos cálidos e inviernos bastante fríos con una oscilación térmica importante (de unos 18°C). La estación estival es la más seca y en ella se superan, con gran frecuencia, los 30°C, alcanzándose esporádicamente más de 35°C. Sin embargo, en invierno es frecuente que las temperaturas bajen de los 0°C, produciéndose numerosas heladas y nevadas esporádicas. Las precipitaciones anuales en la zona de estudio se sitúan mayoritariamente entre los 400-600mm, con un máximo durante el otoño y la primavera.

La serie de 61 años (1946-2007) de la estación de Cuatro Vientos muestra que la precipitación media anual es de 437.9 mm (figura 3.3), mientras que la temperatura anual media para la serie 1974-2007 es de 15.2°C.

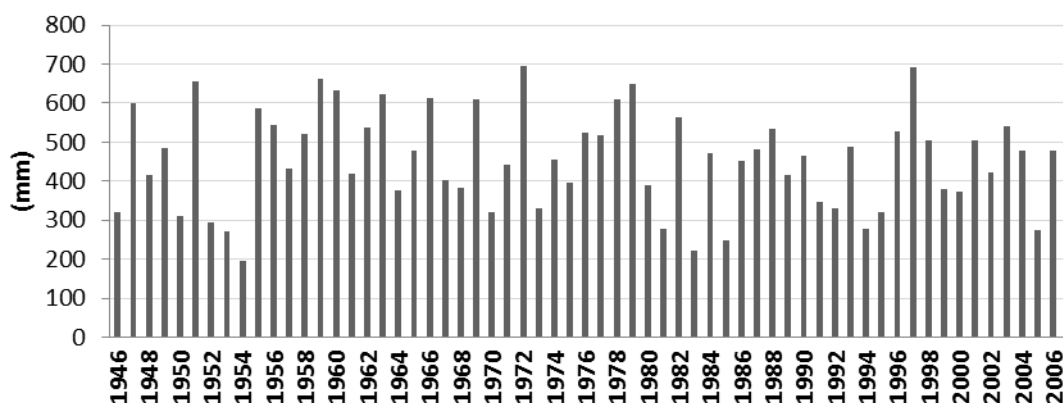


Figura 3.3: Precipitación total anual en mm de la serie 1946-2007.

El balance hídrico del suelo, realizado con los valores climáticos medios de las campañas 1973/74 a 2007/08, muestra la clara escasez de precipitaciones durante los meses de junio, julio, agosto y septiembre, que se refleja en un marcado déficit hídrico del suelo durante estos meses (figura 3.4). Para la elaboración de este balance hídrico, la evapotranspiración potencial fue calculada a partir de la radiación global incidente media diaria y la temperatura media mensual, mediante el procedimiento de Turc (1961), ya que ofrece un mejor ajuste que el de Thornthwaite (1948) en climas mediterráneos (Lecarpentier, 1975; Almorox, 2007). Para el cálculo de este balance se considera una reserva máxima de agua en el suelo de 100 mm.

Parámetros	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Ab	May	Jun	Jul	Ago	Anual
Tm (°C)	21.8	15.2	9.8	6.7	6.1	7.7	10.9	12.8	17.1	22.8	26.2	25.7	15.2
Pm (mm)	23.2	55.3	57.3	53.4	36.2	37.0	26.9	47.7	49.9	25.0	13.3	13.3	36.5
Rad. diaria media (cal/cm ²)	443.5	288.6	190.5	141.2	173.4	251.1	377.3	468.5	547.3	635.1	651.5	574.3	-
ETP (mm)	128.4	75.7	43.9	28.2	29.7	48.2	81.0	106.3	139.3	179.1	193.9	172.1	102.2
Var. humedad (mm)	0.0	15.2	17.4	20.6	2.7	-0.8	-24.8	-18.0	-5.2	-2.7	0.0	0.0	-
Ret. humedad (mm)	0.0	15.2	32.6	53.2	55.2	50.5	25.7	7.7	2.7	0.0	0.0	0.0	-
ET real (mm)	23.2	38.5	34.7	22.0	25.7	33.4	51.3	65.7	55.1	27.7	13.3	13.3	33.7
Déficit (mm)	105.2	37.2	9.2	6.2	3.9	14.8	29.7	40.6	84.1	151.4	180.6	158.8	68.5
Excedente (mm)	0.0	1.6	5.2	10.7	7.8	4.5	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	2.5

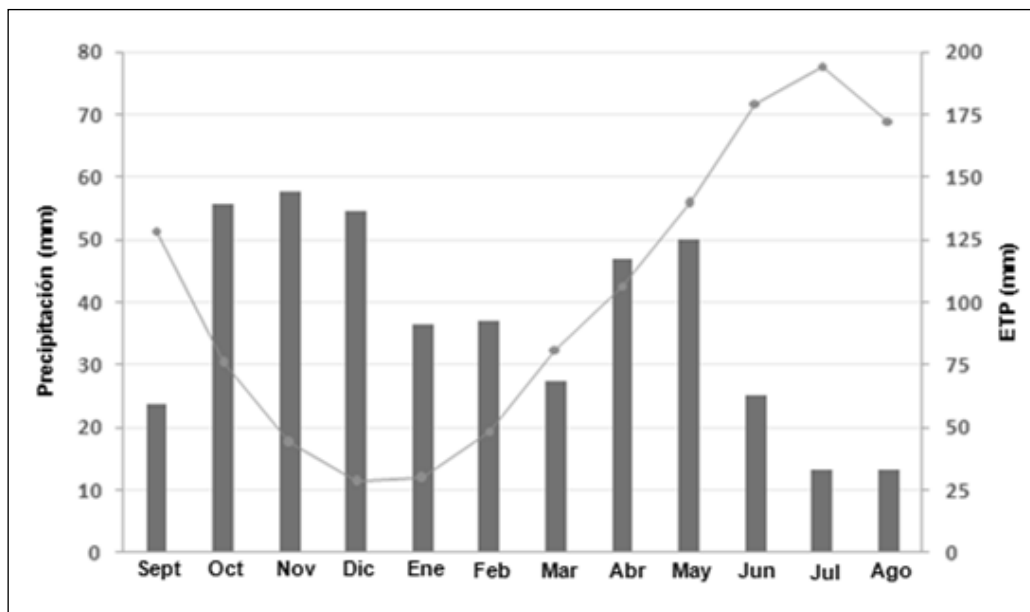


Figura 3.4: Ficha climática y balance hídrico del suelo para la serie 1973/74-2007/08 (tabla superior) y distribución de los valores medios mensuales de las precipitaciones (en columnas) y evapotranspiración potencial (ETP) (línea gris).

Con estas características, se ha definido el clima de la zona de estudio como un clima Mediterráneo continental.

La clasificación de Köppen enmarca el clima del área de estudio dentro del grupo Csa. Los climas tipo C en la clasificación de Köppen son climas templados, donde la temperatura media del mes más frío está comprendida entre 0 y 18°C. A su vez, el subtipo Cs hace referencia a la existencia de un período marcadamente seco en verano, así como la variante a describe un verano caluroso (temperatura media del mes más cálido superior a 22°C).

El grupo Csa es la variedad de clima que abarca una mayor extensión de la Península Ibérica y Baleares, ocupando aproximadamente el 40% de su superficie. Se extiende por la mayor parte de la mitad sur y de las regiones costeras mediterráneas, a excepción de las zonas áridas del sureste (AEMET, 2011) (figura 3.5).

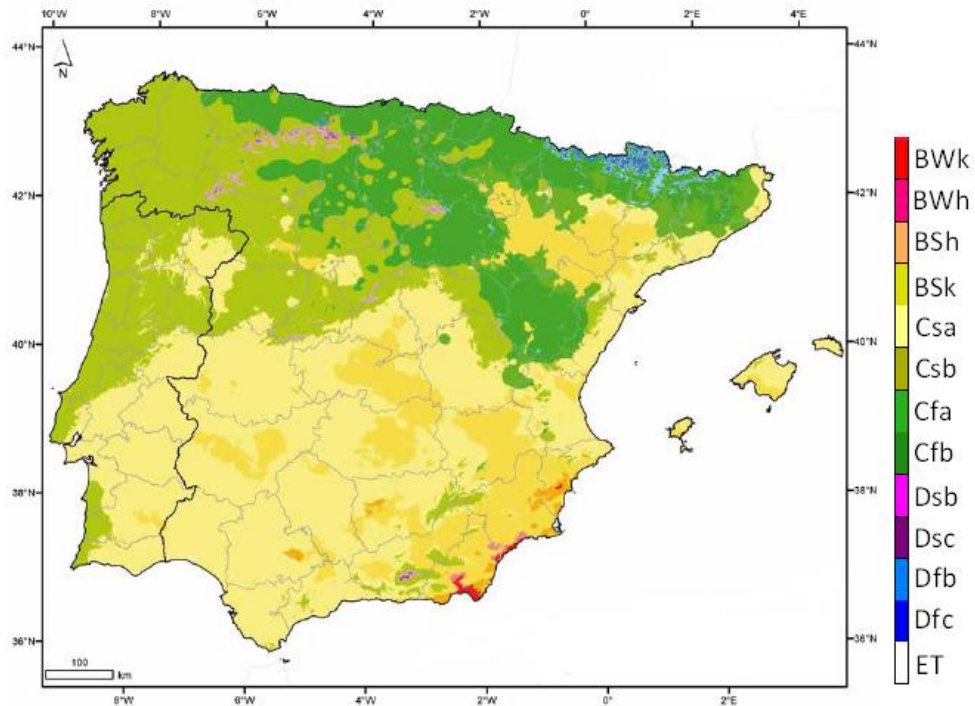


Figura 3.5: Clasificación climática de Köppen en la Península Ibérica e Islas Baleares. Se observa que la mayor parte de la Comunidad de Madrid se encuadra en la franja Csa (Modificado del Atlas Climático Ibérico, AEMET, 2011).

De acuerdo con la clasificación climática de Thornthwaite, el clima del área de estudio es del tipo $DB_4' db_2'$, y por tanto semiárido mesotérmico con una evapotranspiración potencial anual de 1071 mm, con poco o ningún excedente de agua en el suelo a lo largo del año y una concentración estival de la eficacia térmica media.

Por otro lado, la zona de estudio se encuentra dentro de la región biogeográfica Mediterránea, y dentro de esta en el piso mesomediterráneo superior. Desde el punto de vista de la tipología biogeográfica de España, Madrid se sitúa dentro de la provincia Carpetano-Ibérico-Leonesa, en el sector Guadarrámico y dentro del subsector Ayllonense (figura 3.6), que presenta como especie vegetal característica el *Quercus ilex* spp. *rotundifolia* o encina y la *Retama sphaerocarpa* y sobre arenales el *Adenocarpus aureus*. La organización común es la de bosques y bosquetes esclerófilos con estas especies como predominantes (Rivas-Martínez y Peinado, 1987).

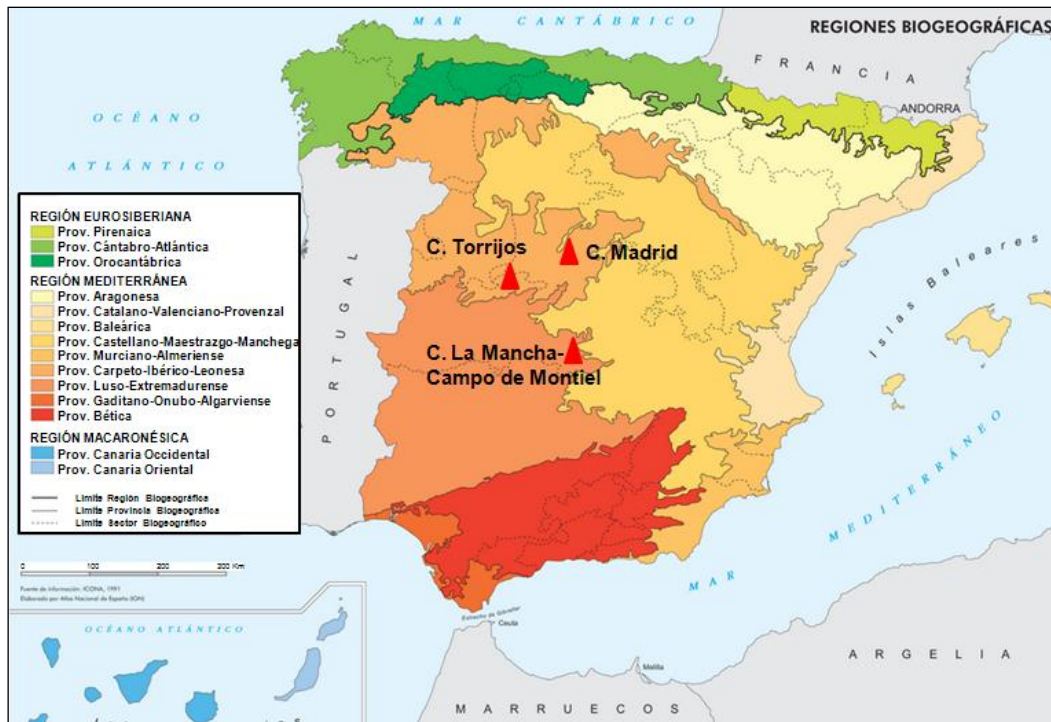


Figura 3.6: Mapa de las regiones biogeográficas en España con las localizaciones de las 3 áreas de estudio. Tomado del Atlas Nacional de España, 2008 (Instituto Geográfico Nacional).

3.2.3. Edafología y usos del suelo

Los suelos característicos del área de estudio corresponden al tipo genérico de *Suelos Pardos No Cálcidos* descritos por Guerra Delgado (1968) en los depósitos sedimentarios terciarios de la zona centro de España. Se trata de suelos con perfiles edáficos profundos y morfología característica tipo Ap/B/C, con límites generalmente abruptos entre los horizontes superficiales y, con frecuencia, presencia de uno o más horizontes subsuperficiales. En cuanto a las propiedades físicas, destaca un marcado contraste estructural entre el horizonte superficial Ap, de estructura generalmente débil, suelto o formando agregados subangulares, y el horizonte B, de estructura muy desarrollada y estable, que varía desde subpoliédrica a prismática. También suele presentarse un acusado contraste textural entre ambos horizontes, siendo frecuentes incrementos en el contenido de arcilla de hasta un 25% en el horizonte B respecto al Ap. Se trata de suelos pobres en materia orgánica y con contenido variable en arcillas, sobre todo en los horizontes subsuperficiales, ya que son suelos que en su mayoría han sido fuertemente lavados. En el área de estudio son los luvisoles junto a los cambisoles los más representados (Monturiol Rodríguez y Alcalá del Olmo Bobadilla, 1990) (figura 3.7).

Los cambisoles se caracterizan por la ausencia de una capa de arcilla acumulada, humus, sales solubles, o de hierro y óxidos de aluminio. Se diferencian del material parental no erosionado en su estructura global, color, contenido de arcilla, contenido de carbonato, o de otras propiedades. Debido a su estructura global favorable y alto contenido de minerales, por lo general pueden ser explotados para la agricultura, siempre que se consideren las limitaciones de terreno y clima. Su perfil característico tipo es A/B/C. El horizonte B, horizonte cámbico que da nombre al suelo, se caracteriza por una débil a moderada alteración del material original, por la ausencia de cantidades apreciables de arcilla, materia orgánica y compuestos de hierro y aluminio, de origen iluvial.

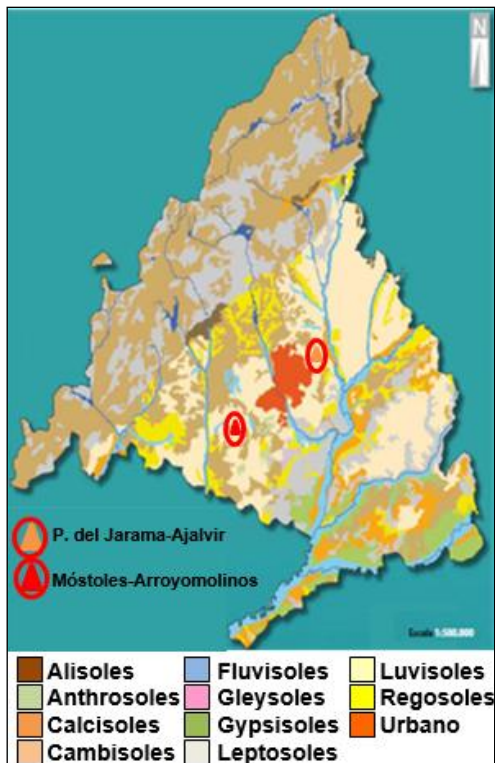


Figura 3.7: Mapa de asociaciones de suelo (sistemática FAO) de la Comunidad de Madrid. En él pueden verse las localizaciones de las áreas estudiadas, que por proximidad se han simplificado a 2: el área de Paracuellos del Jarama y Ajalvir y, por otro lado, el de Móstoles y Arroyomolinos.

Fuente: FIDA. Centro de investigaciones ambientales "F. González Bernáldez" Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio de la Comunidad de Madrid (2001).

Los luvisoles son suelos con una mineralogía mixta, alto contenido de nutrientes, y un buen drenaje que los hace adecuados para una amplia gama agrícola. Los Luvisoles generan paisajes planos o ligeramente inclinados bajo regímenes climáticos que van de frío a templado cálido Mediterráneo. Su perfil tipo es el A/Bt/C. En la zona central de España son los de más clara vocación agrícola, dedicándose desde hace mucho tiempo al cultivo cerealístico. Estos suelos se presentan en la zona del estudio como tierras con severas limitaciones que reducen la gama de cultivos y/o requieren especiales técnicas de manejo (clase agrológica 3) indicando también que muestran limitaciones en la zona radicular (subclase s) y limitaciones climáticas (subclase c) (Mapa Agrológico de la Comunidad de Madrid, 2005).

Debido a las condiciones climáticas de la zona y a la alta explotación agrícola de estos suelos es común la aparición de perfiles edáficos truncados, en los que quedan expuestos en superficie horizontes edáficos originariamente subsuperficiales, sobre todo en las zonas de hombrera y partes altas de las laderas (De Alba, 1998).

La Comunidad de Madrid presenta una superficie total de 802.180 ha, de las que se encuentran cultivadas un total de 543.470 ha (67.75%), de las cuales 375.372 ha son tierras labradas de secano, en torno al 69% del total (Censo Agrario del Instituto Nacional de Estadística, 2009).

3.3. Comarca de La Mancha-Campo de Montiel

3.3.1. Marco fisiográfico y geológico

Las localizaciones que se sitúan en la Comarca de La Mancha-Campo de Montiel: Villarrubia de los Ojos, Pedro Muñoz y Valdepeñas, se encuentran dentro de la zona media-alta de la Cuenca Hidrográfica del Guadiana (figura 3.8).

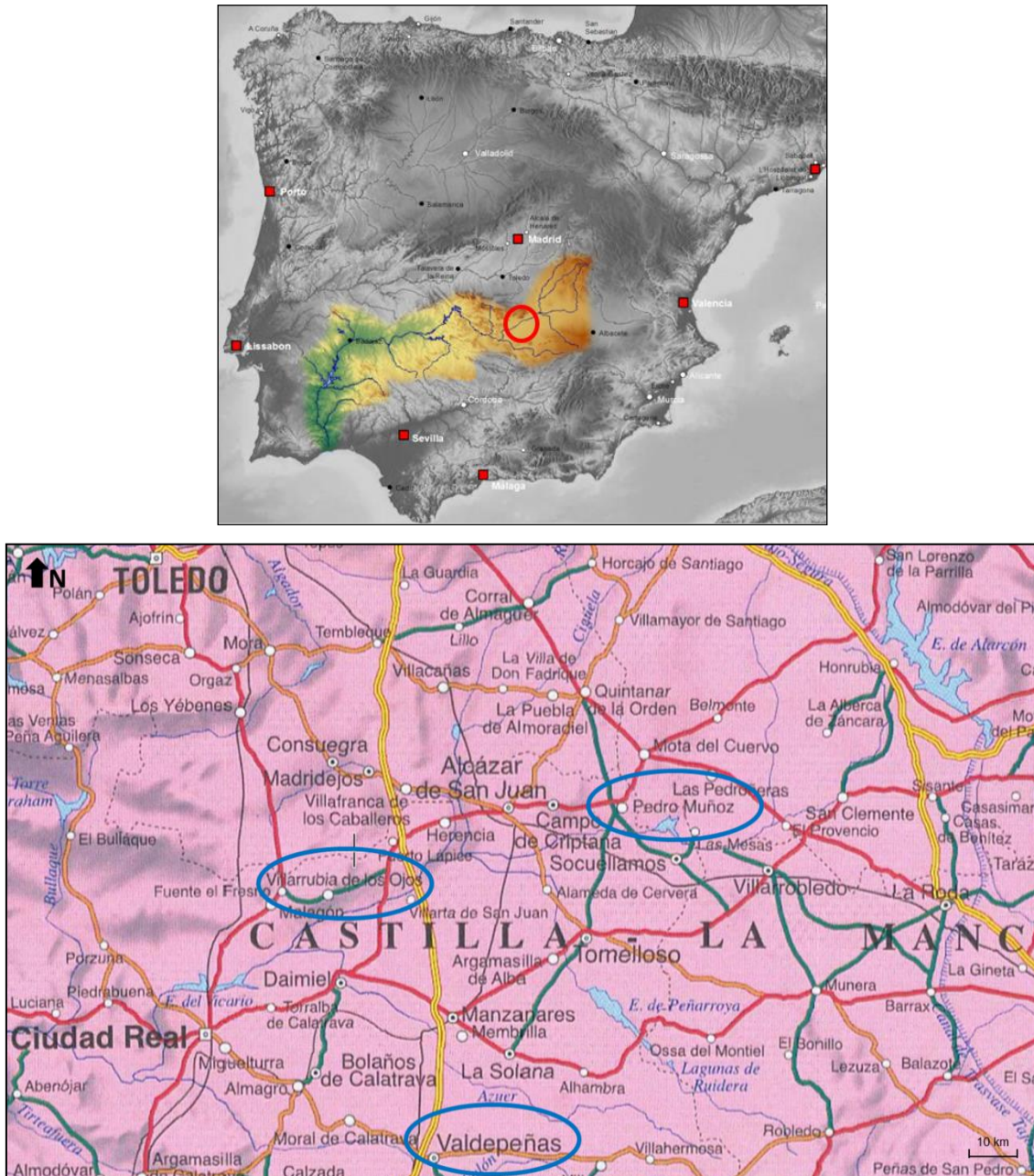


Figura 3.8: Mapa de situación de las diferentes áreas de estudio dentro de la Comarca La Mancha-Campo de Montiel.

En la figura superior puede observarse la Cuenca Hidrográfica del Guadiana, donde la elipse roja delimita la zona de estudio dentro de la misma. Fuente: <https://wikipedia.org> En la figura inferior pueden observarse las localizaciones concretas de las poblaciones donde se situaron las laderas agrícolas de estudio, en elipses azules. Fuente: Visor SIG-PAC. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA).

Villarrubia de los Ojos, Valdepeñas y Pedro Muñoz son localidades eminentemente agrarias que se sitúan dentro de la Provincia de Ciudad Real, Comunidad de Castilla-La Mancha. Mientras Villarrubia de los Ojos se ubica en la parte Norte de la provincia, casi en el límite con la provincia de Toledo, Pedro Muñoz lo hace al Noreste, cerca del límite con la provincia de Albacete, y Valdepeñas, más al Sur, en la parte central de la provincia.

Los términos municipales de Valdepeñas y Pedro Muñoz se encuentran sobre una superficie topográficamente llana, la Llanura Manchega. El caso de Villarrubia de los Ojos es algo diferente, ya que el término municipal se extiende sobre la Llanura Manchega en su parte meridional, pero sobre las estribaciones de la Sierra de Calderina, una de las múltiples sierras en que se subdividen los Montes de Toledo y la más oriental de todas, en su parte septentrional.

La altitud media de la llanura manchega en esta zona es de 625 m. A pesar de la denominación de llanura, no se trata de un relieve completamente plano, sino que está ligeramente alomado, debido a las formas que otorga el modelado kárstico existente. La transición entre los Montes de Toledo y la Llanura Manchega es en forma de rampa detrítica que conecta el piedemonte con las zonas más bajas y que se conoce con el nombre de raña.

En el caso de Villarrubia de los Ojos, al Norte del término municipal pueden observarse los principales rasgos geológicos de la zona, que están determinados por los afloramientos de un sustrato paleozoico que comprende metasedimentos que abarcan desde el Cámbrico inferior al Ordovícico, deformados en la Orogenia Hercínica y Alpina. Los relieves constituidos por estos materiales (Sierra de la Calderina) se encuentran bordeados por sedimentos, de escaso espesor, pero que ocupan grandes extensiones. Estos sedimentos son de origen continental, pertenecientes a las coberturas neógenas de la Llanura Manchega, así como por depósitos cuaternarios de variados orígenes (figura 3.9).

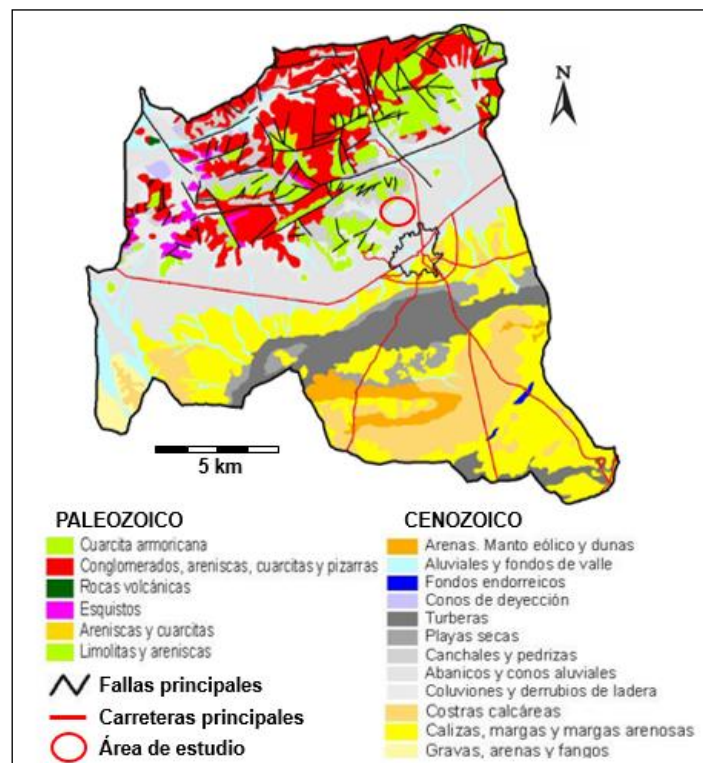


Figura 3.9: Esquema geológico del término municipal de Villarrubia de los Ojos, modificado del Mapa Geológico Nacional (IGME) (tomado de Jerez García, 2008).

Los materiales paleozoicos que afloran en esta parte Norte del término municipal se incluyen en la Zona Centro Ibérica (ZCI) del Macizo Hespérico, según el esquema geoestructural propuesto por Julivert et al. (1972). Desde un punto de vista estructural, los afloramientos hercínicos se sitúan en el sector NE del Dominio de Pliegues Verticales de la ZCI (Diez Balda, 1990). Se trata, en líneas generales, de materiales cuarcíticos y pizarrosos con intercalaciones carbonatadas pertenecientes al Cámbrico y Ordovícico (Dominio de los Pliegues Verticales de la ZCI).

Al Sur del municipio, afloran los sedimentos detrítico-carbonatados de origen continental, del Mioceno, Plioceno y Cuaternario pertenecientes a la Llanura Manchega, sobre los que, igualmente, se sitúan los municipios de Valdepeñas y Pedro Muñoz.

En líneas generales, la Llanura Manchega corresponde a una depresión morfoestructural en la que, sobre un zócalo formado por pizarras, cuarcitas, areniscas, conglomerados, arcillas y yesos en su parte Oeste, y por calizas, dolomías, margas y arenas en el centro y Este (Paleozoico y Mesozoico), se ha depositado una formación continental moderna constituida por conglomerados, arenas y arcillas (Mioceno); margas y calizas de origen lacustre (Plioceno), serie que a su vez esta recubierta parcialmente por materiales detríticos del Cuaternario donde se dieron depósitos de limos y arcillas con materia orgánica que han dado lugar a algunas turberas (De Bustamante et al., 1995) (figura 3.10).

En la columna estratigráfica sintética completa de la zona de estudio aparecen en primer lugar en la serie una formación carbonatada compuesta por calizas marmoreas, arcosas y calcarenitas sobre las cuales se sitúan grauvacas, lutitas y materiales volcánicos (ignimbritas), todos ellos materiales del Cámbrico. Por encima de éstos aparecen materiales ordovícicos formados por conglomerados cuarcíticos sobre los cuales se dispone una alternancia de cuarcitas, areniscas y pizarras y para finalizar la serie se encuentra la cuarcita armoricana. No se produjo sedimentación a partir del Arenig. Por encima de estos materiales aparecerían ya rellenos cuaternarios de naturaleza detrítica, cuarcitas y areniscas fundamentalmente (figura 3.11).

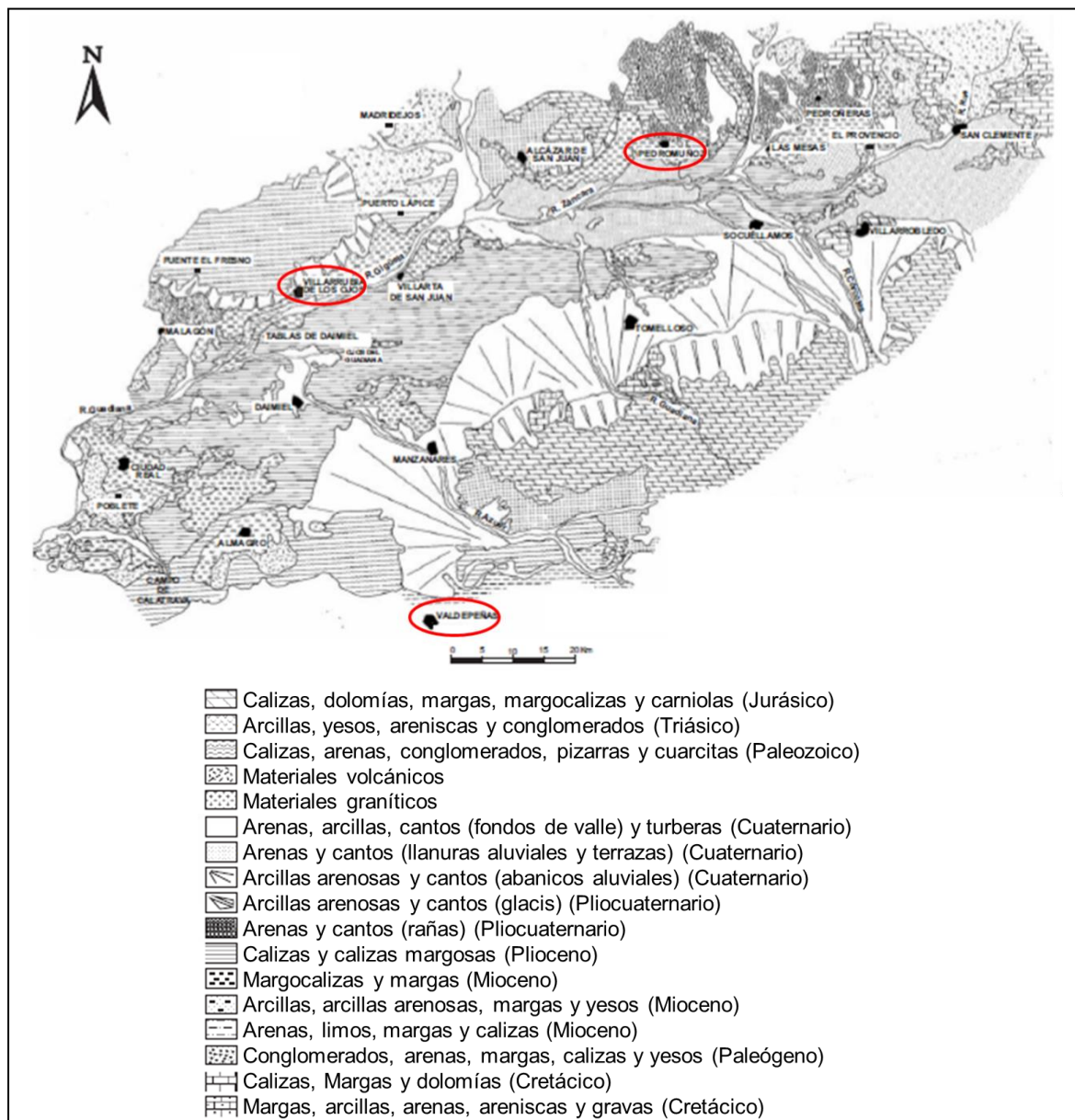


Figura 3.10: Esquema geológico de la Llanura Manchega con las unidades litológicas y geomorfológicas más significativas (De Bustamante, 1988, en Valdeolmillos Rodríguez, 2005). En el mismo se resaltan las posiciones de Villarrubia de los Ojos, Valdepeñas y Pedro Muñoz con elipses rojas.

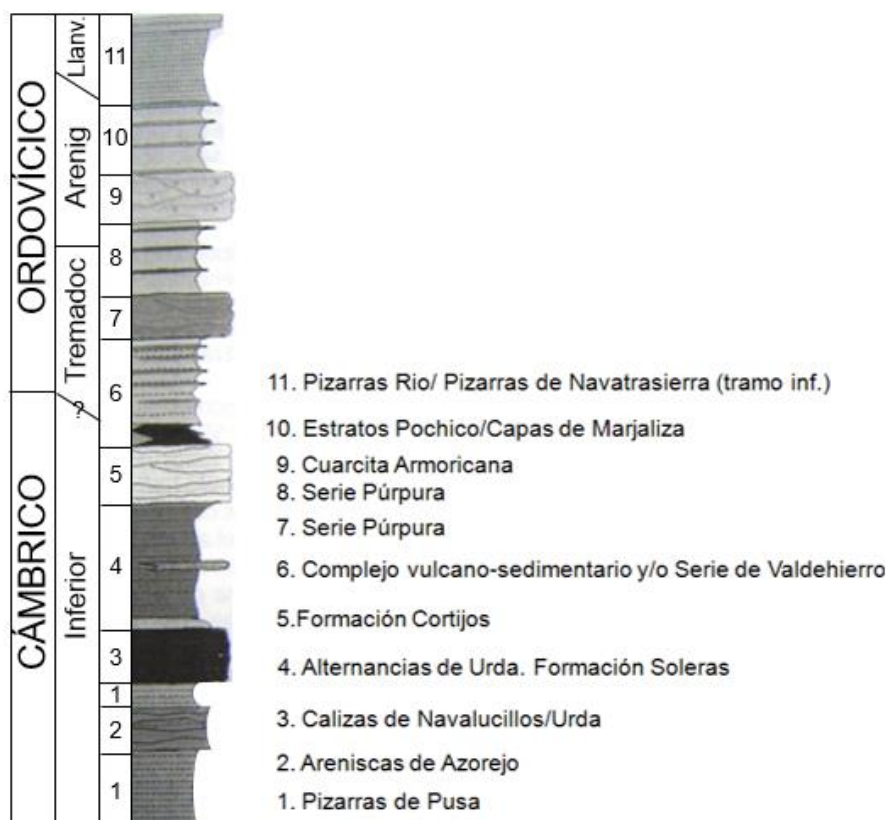


Figura 3.11: Columna sintética y tramos cartográficos del área de estudio (memoria del Mapa Geológico de España, hoja nº 737, Villarrubia de los Ojos, IGME, 2007)

3.3.2. Climatología y vegetación.

Para la caracterización climática del área de estudio han sido utilizados los datos suministrados por la Agencia Estatal de Meteorología del observatorio de Villarrubia de los Ojos (código 4112A) para el periodo que va de 1946 a 2006, en precipitaciones, y de 1984 a 2006 en temperaturas.

El clima dominante en la zona de estudio, a grandes rasgos, presenta veranos cálidos y secos e inviernos bastante fríos con una oscilación térmica importante. La Mancha es la zona de clima más continentalizado de España, con valores extremos en observatorios como el de Arenas de San Juan, con más de 22°C de amplitud media anual. La serie de 22 años (1984-2006) de la estación de Villarrubia de los Ojos muestra que la temperatura media anual es de 15.1°C.

La precipitación media anual en Villarrubia para la serie de 60 años (periodo 1946-2006) es de 436 mm, aunque existen dos épocas en que por razones desconocidas no existen datos en el registro (1950-1960 y 1978-1985). Los años más lluviosos se llegan a superar los 600 mm, mientras que los más secos son aquellos con poco más de 200 mm.

De acuerdo al reparto estacional, el invierno es la estación más lluviosa, seguida por la primavera y otoño. Los días en los que llueve al año se sitúan entre los 50-60 como promedio. Casi toda la precipitación es en forma de lluvia, ya que tan sólo hay 1.2 días de nieve al año como promedio en Villarrubia y aún menos de granizo, siendo imperceptible la denominada precipitación oculta u horizontal en forma de niebla, rocío o escarcha. El verano es marcadamente seco (figura 3.12).

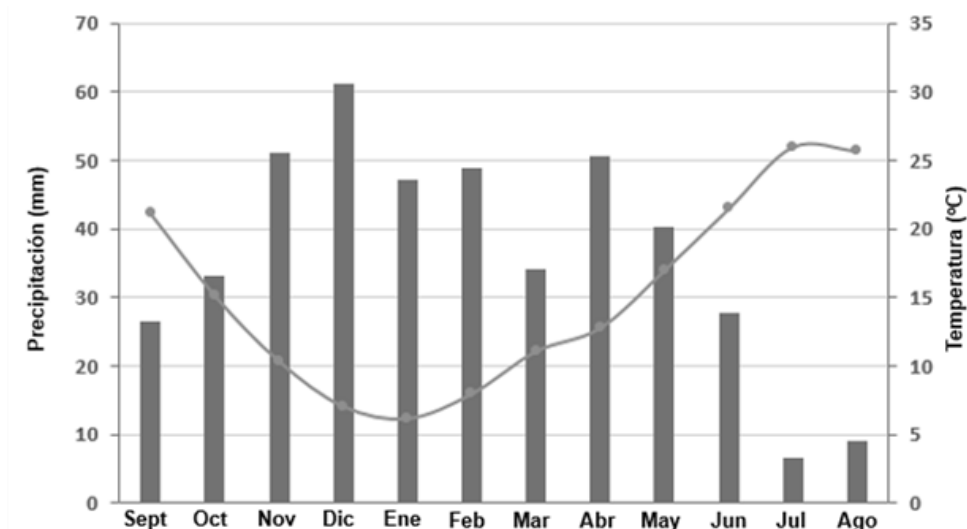


Figura 3.12: Gráfico termopluiométrico de la serie de años agrologicos 1946/1947-2005/2006 para las precipitaciones y de 1984/1985-2005/2006 para las temperaturas.

Con respecto a la dirección del viento dominan las direcciones atlánticas del Oeste y subdominan las del Noreste y Suroeste. Otras direcciones menores serían las mediterráneas del E y SE (INM, 1980, en Jerez García, 2009).

El efecto de estos vientos, especialmente aquéllos del Oeste y el Suroeste, conjugado con la presencia de los relieves de la Sierra de la Calderina al Norte del municipio, provoca una barrera altitudinal ante el paso de los temporales, provocando una mayor precipitación en Villarrubia de los Ojos que en las otras dos localidades. De esta manera, este sector oriental de los Montes de Toledo se encuentra atravesado por la isoyeta de 500 mm (Jerez García, 2009).

También, la presencia de la Sierra de la Calderina, junto con la cercanía de extensas zonas palustres al Sur, Las Tablas del Cigüela, influye en el clima del área de estudio, al producirse con cierta frecuencia tormentas estivales de carácter convectivo. El calor de la época estival provoca una fuerte evaporación en las masas de agua, especialmente en aquéllas cuya profundidad es escasa, lo cual humedece las masas de aire existentes. Cuando este fenómeno se combina con la presencia del viento del Suroeste, éste empuja las masas de aire hacia la Sierra de la Calderina haciéndolas ascender. Al tener que salvar desniveles superiores a los 600 m en un espacio muy corto, se provoca una saturación del aire, condensación y la consiguiente precipitación. Esta descripción justifica la precipitación de carácter convectivo que dio lugar al episodio erosivo caracterizado en Villarrubia de los Ojos y enmarca los suelos de esta zona como especialmente vulnerables ante episodios como los descritos. Algunos autores consideran que en la Sierra de la Calderina es la localización donde se produce el mayor número de tormentas de toda Castilla-La Mancha, debido a estas condiciones particulares (Elías Castillo y Ruiz Beltrán, 1981).

Con estas características, se puede decir que el clima de la zona de estudio es templado, de tipo mediterráneo, de matiz continentalizado, seco o semiárido en la parte de la Llanura Manchega y más fresco y lluvioso en la zona montañosa septentrional. Con veranos siempre cálidos y secos e inviernos húmedos, pero con una gran irregularidad termométrica y sobre todo pluviométrica, tanto mensual como anual.

Según la clasificación de Köppen el clima de la zona es templado con verano cálido y seco, tipo Csa (ver figura 3.4). De acuerdo con la clasificación climática de Thornhwaite, a partir de los valores del observatorio meteorológico de Villarrubia de los Ojos, el clima es del tipo DB₂' sb₃', semiárido mesotérmico con una evapotranspiración potencial anual (ETP) de 813.5 mm, un

excedente de agua en el suelo durante el invierno moderado y una concentración estival de la eficacia térmica media.

El municipio de Villarrubia de los Ojos se encuentra en la frontera entre dos provincias biogeográficas (Rivas-Martínez y Peinado, 1987) dentro de la región Mediterránea.

Por un lado, la zona septentrional del municipio, la perteneciente a las estribaciones de la Sierra de la Calderina se encuentra dentro de la provincia Luso-Extremadurenses, sector Toledano-Tagano, subsector montitoledano que presenta como vegetación característica la serie de los encinares silicícolas mesomediterráneos luso-extremadurenses, caracterizada por el *Quercus ilex* spp. *rotundifolia* o encina en las solanas acompañados en las umbrías por el *Quercus suber* o alcornoque y el *Quercus faginea* o quejigo, así como sobre los suelos más silíceos la *Retama sphaerocarpa* y en los más erosionados abundan los jarales (*Cistus albidus*) La organización común es la de bosque o bosquete esclerófilo con estas especies como predominantes (Rivas-Martínez, 1987).

Por otro lado, el área perteneciente a la Llanura Manchega, tanto en el caso de Villarrubia de los Ojos como en los del Pedro Muñoz y Valdepeñas, se encuentra dentro de la provincia Castellano-Maestrazgo-Manchega, sector Manchego, subsector Guadianés que presenta como vegetación característica la serie de los encinares calcícolas mesomediterráneos castellano-manchegos secos caracterizada por pequeños bosquetes de *Quercus ilex* spp. *rotundifolia* o encina y sobre todo por *Juniperus oxycedrus* (enebral arborescente) y *Quercus coccifera* (coscojares) allí donde el suelo es rico en iones, así como donde aparece la perturbación antrópica aparecen la *Retama sphaerocarpa* igual que donde el suelo es esquelético o poco desarrollado rico en iones aparecen los tomillares, salviares, esplegueras y aulagares (Rivas-Martínez, 1987).

3.3.3. Edafología y usos del suelo.

Los suelos característicos del área de estudio corresponden a dos asociaciones diferentes, ligados a los dos contextos geológicos anteriormente descritos (figura 3.13).

Por un lado, en la zona septentrional de Villarrubia de los Ojos y ligados a los materiales metamórficos existentes, los suelos característicos corresponden al tipo genérico de *Suelos Pardos Meridionales* descritos por Guerra Delgado (1968). Dichos suelos se desarrollan sobre el substrato paleozoico de la España semiárida, son de escasa o media profundidad, fácilmente erosionables y su morfología característica es de tipo A/B/C, con límites entre horizontes no abruptos.

Respecto a las propiedades químicas, se trata de suelos moderadamente ácidos con valores de pH alrededor de 6 en el horizonte superficial e incluso superior en los horizontes inferiores. Sin carbonatos, el contenido en materia orgánica es pobre, oscilando entre el 2-3% en el horizonte A y menos del 1% en el B, con capacidades de intercambio catiónico bajas (Guerra Delgado, 1968)

Por otro lado, en la Llanura Manchega, las asociaciones de suelo características corresponden al tipo genérico de *Suelos Rojos Mediterráneos*, en este caso sobre materiales silíceos, también descritos por Guerra Delgado (1968). En este amplio concepto se agrupan todos los suelos españoles de colores rojizos, no litóchromos, de perfil A/B/C.

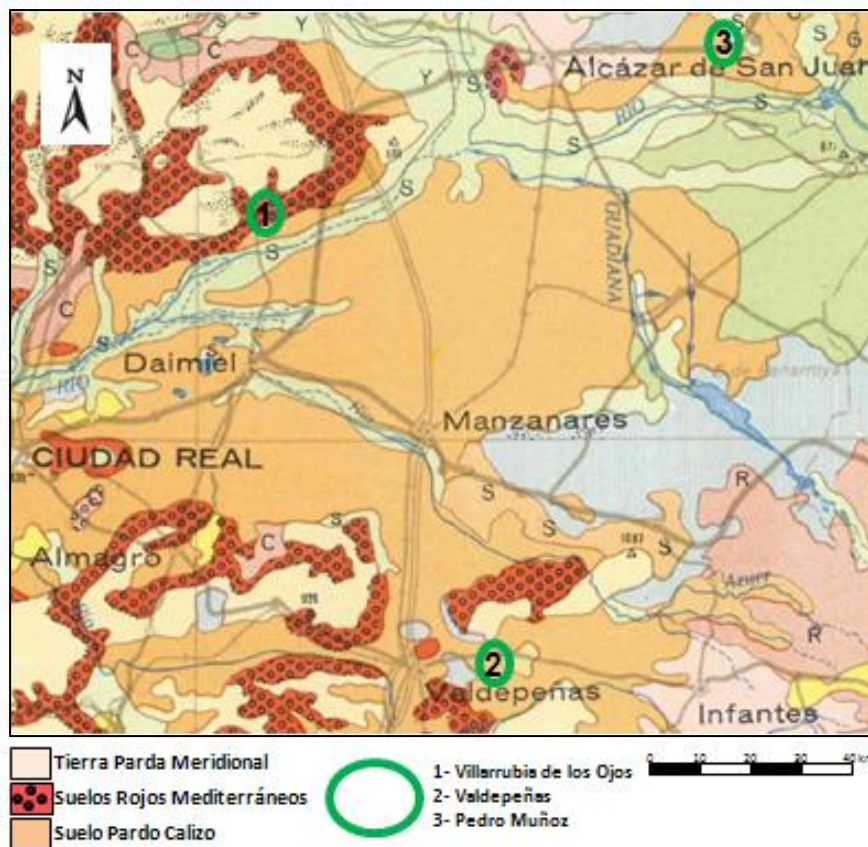


Figura 3.13: Detalle del Mapa de Suelos de España (escala 1:1.000.000) (Guerra Delgado, 1968).
Las elipses verdes indican cada una de las tres zonas de estudio.

En este caso se trata de suelos sobre materiales silíceos, que se forman por lo general sobre pizarras, arcosas y rocas ígneas básicas fácilmente meteorizables. Cubren grandes superficies de la España silícea, dominando la penillanura con formas de relieves suaves, en las que sobresalen muchas veces las cresterías de cuarcitas como material más resistente a la erosión. Son suelos de alta pedregosidad debido a que la fractura física de las cuarcitas, anteriormente nombradas y que se sitúan topográficamente como cresterías, origina gran cantidad de cantos, poco o nada rodados.

Se trata de suelos normalmente cultivados y donde el horizonte de humus raramente aparece. Por debajo del horizonte B existe un horizonte de acumulación de carbonato cálcico, por lo general en forma de nódulos amarillentos y costras. El horizonte superior es de color pardo, de tonalidades distintas según el contenido en materia orgánica y considerado normalmente de formación actual, es decir, que cuando se desarrolló el horizonte de rubefacción B, este horizonte superficial no existía. Según esto, este horizonte se puede interpretar como un comienzo de formación de una tierra parda meridional. Se trata de suelos con pH neutro o moderadamente ácido y de media o escasa capacidad de cambio de cationes, siendo el calcio de cambio el elemento dominante en ese caso.

El aprovechamiento de estos suelos corresponde normalmente, en el caso de las *Tierras Pardas Meridionales*, a la dehesa de encinas, alcornoques y jarales con pastizales, en general pobres en plantas forrajeras. Otras veces se ha 'limpiado' totalmente el monte y se cultiva el viñedo. En el caso de los *Suelos Rojos Mediterráneos* la dedicación preferente es la del cultivo del cereal, leguminosas, olivar y viñedo. Si las condiciones topográficas no son muy desfavorables, constituyen excelentes secanos.

Por otro lado, Carlevaris et al. (1992) diferencian fundamentalmente en la zona de estudio dos asociaciones edafológicas.

- 1- Una primera que caracteriza una de las asociaciones paisaje-uso del suelo más tradicionales del conjunto La Mancha-Montiel: el olivar, bien en solitario bien asociado a viñedos, e implantado, en este caso, en las laderas de la Sierra de la Calderina. Se trata de suelos desarrollados sobre pendientes convexas, variables entre suaves (5%) y moderadamente acentuadas (15%), propias de los piedemontes y coluvios de ladera. Los suelos más representativos de este área son el *Luvisol crómico* (LVx) (suelo rojo mediterráneo) y el *Cambisol crómico* (CMx) (suelo pardo litócromo). En general, se trata de suelos caracterizados por un horizonte sub-superficial Bt o Bw, respectivamente.
- 2- En la zona de la Llanura Manchega se desarrolla el área más característica del agro manchego. Se trata de una zona con aprovechamientos propios del secano (viñedo y cereal) y en algunos casos, haya donde aparece el regadío, alfalfa, maíz, remolacha, etc. El material originario sobre el que se han desarrollado estos suelos es relativamente moderno, Pliocuatrnario, y está constituido por rellenos de la cuenca de muy diversa naturaleza. El suelo más representativo es el *Cálcisol pétrico* (CLp) (suelo pardo calizo de costra caliza), asociado al *Cambisol calcárico-crómico* (CMxc) (suelo pardo-rojizo). Son suelos con perfiles Ap/Bw/Ck, presentando ambos en su perfil acumulaciones de carbonato cálcico, bien en forma de caliche o de costra calcárea, lo más habitual, o bien en nódulos o masas pulverulentas.

En la figura 3.14 se ha tomado el detalle del mapa de suelos de Villarrubia de los Ojos por presentar los dos ejemplos de asociaciones de suelos anteriormente tomadas de Carlevaris et al. (1992). En cuanto a los usos del suelo, en la Comunidad de Castilla-La Mancha, donde, sobre una superficie total de 7,946.300 ha, un total de 6,869.606 ha (86.4%) son tierras cultivadas de las cuales 3,298.369 ha (48%) son de cultivos de secano, correspondiendo 2,546.747 ha (77.21%) a cultivos herbáceos (Censo Agrario del Instituto Nacional de Estadística, 2009).

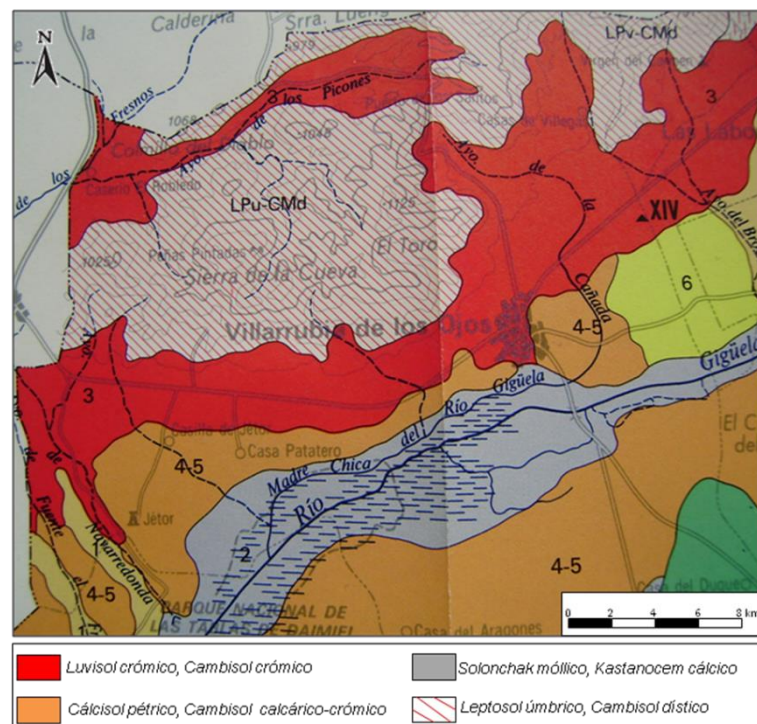


Figura 3.14: Detalle del entorno de Villarrubia de los Ojos del Mapa de Suelos de La Mancha y Campo de Montiel (escala 1:200.000) (Carlevaris et al., 1992).

3.4. Comarca de Torrijos

3.4.1. Marco fisiográfico y geológico

Dentro de la Comarca de Torrijos (Toledo) se han estudiado laderas con rasgos de erosión dentro de los términos municipales de Santa Olalla (finca Las Zorreras), Rielves, Cebolla y Hormigos. Por otro lado, también dentro de la misma comarca, se han realizado mediciones de tasas de erosión mediante parcelas tipo USLE en el campo experimental sobre erosión de suelos agrícolas que se encuentra instalado en la Finca Experimental La Higuera (CSIC). Esta finca tiene una extensión aproximada de 90 hectáreas y se sitúa en los términos municipales de Santa Olalla y Maqueda. La finca Las Zorreras donde se caracterizaron rasgos de erosión sobre una ladera agrícola también pertenece a la propia Finca Experimental La Higuera (figura 3.15).

La comarca de Torrijos, cuyos límites geográficos coinciden con el río Guadarrama y La Sagra al Este, con la Comunidad de Madrid al Norte, el río Tajo al Sur y al Oeste El Casar de Escalona, la comarca de Talavera de la Reina y la Sierra de San Vicente, en las estribaciones de la Sierra de Gredos, se sitúa dentro de la Cuenca Hidrográfica del Tajo. Estructuralmente, el área de estudio se sitúa en la zona central de la Fosa del Tajo, en la zona más occidental de la Cuenca de Madrid, que aparece descrita en el apartado 3.2.1.

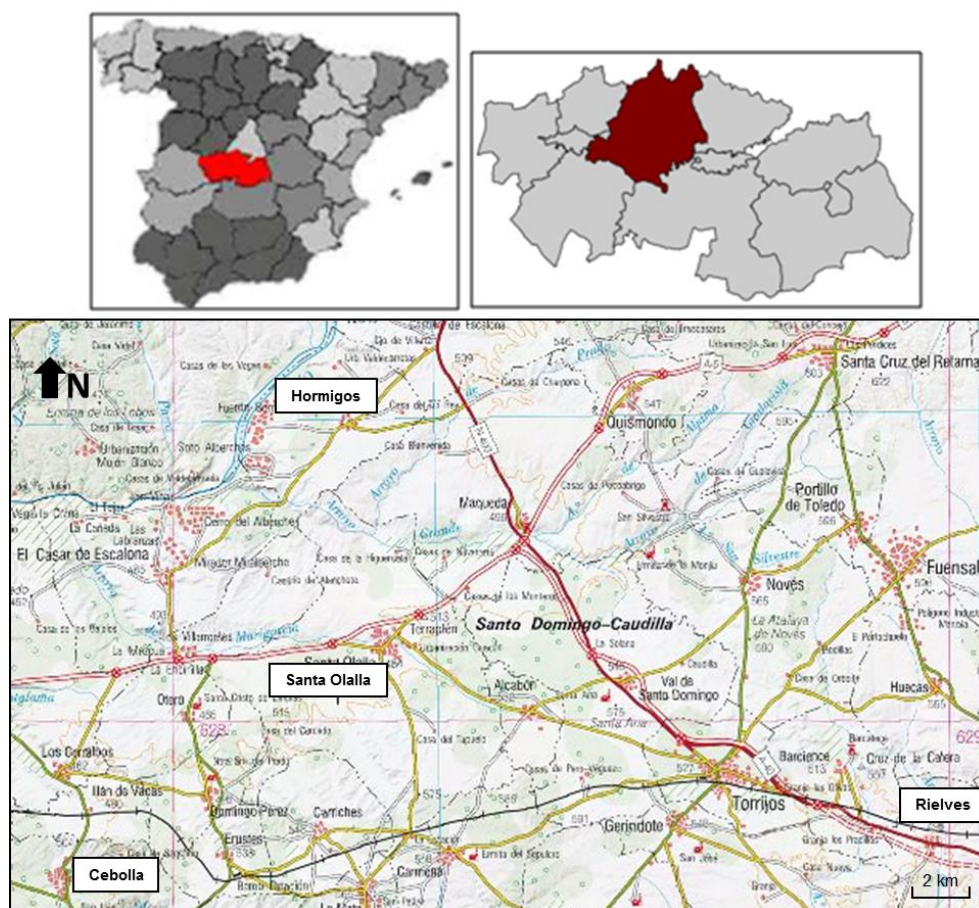


Figura 3.15: Mapa de situación de las diferentes áreas de estudio dentro de la Comarca de Torrijos. En la figura superior puede observarse la ubicación de la provincia de Toledo dentro de España (izquierda) y de la Comarca de Torrijos dentro de la provincia de Toledo (derecha). Fuente: <https://wikipedia.org> En la figura inferior pueden observarse las localizaciones concretas de las poblaciones donde se situaron las laderas agrícolas de estudio dentro de la Comarca de Torrijos. Fuente: Visor SIG-PAC. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA).

Los materiales que afloran en la zona tienen origen sedimentario en su mayoría y están relacionados con la evolución de la Cuenca de Madrid, acontecida dentro del ciclo alpino (figura 3.16). Litológicamente, la región está dominada por materiales del Neógeno. Se trata en su mayoría de facies detríticas no consolidadas compuestas por materiales de naturaleza arcósica, de grano fino con matriz arcillosa, y a veces carbonatada (Martín Escorza y Hernández Enrille, 1972). Dentro de estas series arenosas son también frecuentes las intercalaciones de niveles de facies lutíticas. Estos materiales detríticos propios del Mioceno, presentan una estratificación horizontal como resultado de la erosión de los relieves del Sistema Central y los Montes de Toledo.

Por último, destacar la existencia de sedimentos cuaternarios, dispuestos extensamente sobre el conjunto anterior, a modo de tapiz irregularmente distribuido, relacionándose con la morfogénesis regional más reciente.

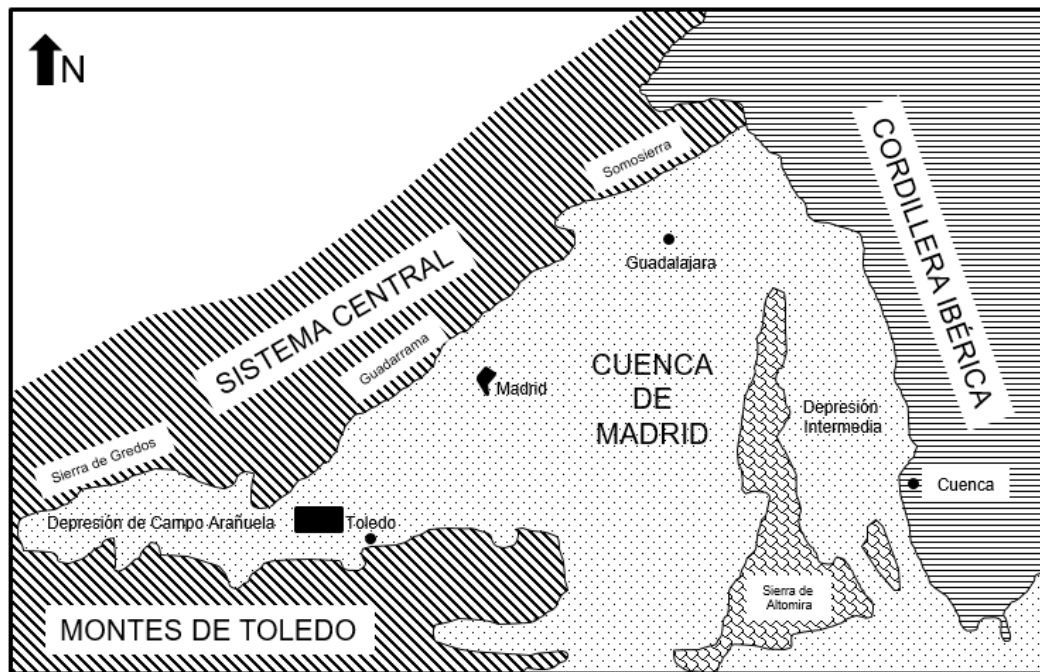


Figura 3.16: Esquema geológico regional de la zona de estudio. El rectángulo negro identifica la zona de Santa Olalla-Rielves, en el límite con los Montes de Toledo (adaptado de la memoria del Mapa Geológico de España, hoja nº 628, Torrijos, IGME, 2007).

El ambiente deposicional se relaciona con sistemas de abanicos aluviales que orlarían los Montes de Toledo durante el Aragoniense inferior-medio. Con el paso del tiempo, en la zona de estudio la disminución de la actividad aluvial permitió el desarrollo de ambientes de llanura lutítica, marginales a los sectores lacustres del centro de la cuenca (memoria Mapa Geológico de España, hoja nº 628, Torrijos, IGME, 2007).

El relieve actual de la Comarca de Torrijos, producido por la configuración de la red fluvial cuaternaria, es suavemente alomado con pendientes medias de entre el 5 y 15 %, aunque en ocasiones se observan pendientes de hasta el 30-35 %. A escala regional, la depresión del Tajo muestra una ligera inclinación hacia el Suroeste debido al basculamiento de la Meseta al final del Terciario (IGME, 1971) que provocó el encajamiento de la red hidrográfica del Tajo y su salida actual al Océano Atlántico. La comarca de Torrijos se encuentra drenada por diversos afluentes de los ríos: Alberche, que discurre con dirección NE-SO; Guadarrama, situado al Este y que también discurre en dirección N-SO; y Tajo, que situado al Sur de la comarca circula en dirección E-O. De todos ellos el cauce fluvial de mayor relevancia en el área de estudio es el río Alberche, que se encuentra al Oeste de la zona de estudio. La zona pertenece a la subcuenca del Alberche

y está incluida en la Unidad Hidrogeológica nº 14 denominada “Terciario detrítico de Madrid-Toledo-Cáceres” del Instituto Geológico y Minero de España (IGME).

3.4.2. Climatología y vegetación

La caracterización climática para las cuatro localizaciones estudiadas dentro de la Comarca de Torrijos (Rielves, Santa Olalla, Cebolla y Hormigos) se ha realizado a partir de los registros de las estaciones meteorológicas de Santa Olalla (años 1948 a 1977) y de la Finca Experimental La Higuera (CSIC) (desde 1977 hasta la actualidad), ambas adscritas a la red de estaciones de la Agencia Estatal de Meteorología (código 3358b). Se asumirá la caracterización climática en Santa Olalla como la de la Comarca de Torrijos.

La característica principal en cuanto a temperatura en la zona es la importante amplitud térmica anual, normalmente entre 18 y 20°C, con unas temperaturas medias mensuales que varían entre 5°C en invierno y 25°C en verano.

Las precipitaciones anuales son generalmente moderadas, si bien, presentan una elevada variabilidad interanual con alternancia de periodos de sequía y periodos de precipitaciones relativamente abundantes. La precipitación media por campaña agrícola (del 1 de septiembre al 30 de agosto) para la serie de 63 años de duración 1948/49 a 2010/11 es de 481 mm (figura 3.17).

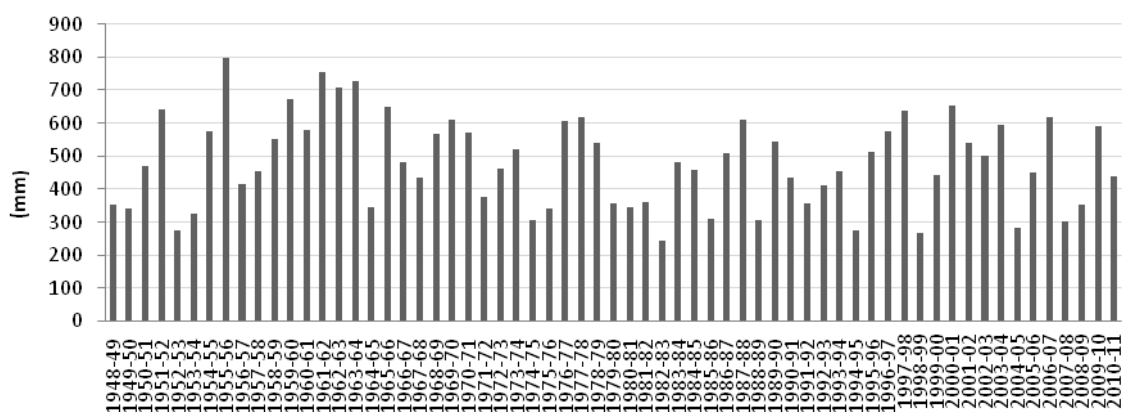


Figura 3.17: Precipitación total por campaña agrícola (mm) de la serie 1948/49 – 2010/11.

A partir de la ficha climática realizada con los valores de las campañas 1975/76 a 2010/11 (figura 3.18) puede observarse la escasez de precipitaciones durante los meses de julio, agosto y en menor medida junio y septiembre que coincidentes con las temperaturas medias más elevadas provocan un importante déficit hídrico en el suelo.

Con estas características se ha definido el clima dominante de la zona como Mediterráneo Continental Semiárido (Oliver et al., 1985).

La clasificación de Köppen enmarca el clima del área de estudio, al igual que el de la zona de la Comunidad de Madrid (ver 3.2.2.), dentro del grupo Csa. Se trata de un clima mesotermal (templado, húmedo, con verano seco) mediterráneo, lluvioso en invierno.

De acuerdo con la clasificación climática de Thornthwaite, el clima del área de estudio es del tipo DB₃' db₃' y por tanto semiárido de tipo mesotérmico con poco o ningún exceso de agua a lo largo del año y una concentración en verano de la eficacia térmica del 50%.

En cuanto a la tipología biogeográfica de España, la Comarca de Torrijos se sitúa, al igual que las localizaciones de la Comunidad de Madrid, dentro de la provincia Carpetano-Ibérico- Leonesa, en el sector Guadarrámico y dentro del subsector Ayllonense (ver 3.2.2.).

Parámetros	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Ab	May	Jun	Jul	Ago	Anual
Tm (°C)	21	15.2	9.5	6.5	5.8	7.4	10.1	12.1	16.2	21.9	25.3	24.9	14.7
Pm (mm)	22.6	61.6	56.5	63.1	45.4	41.5	29.3	47.9	43.6	24.2	7.6	8.9	452.1
Rad. diaria media (cal/cm ²)	343.5	227	149	118	140	201	302	361	427	490	474	427.5	
ETP (mm)	91.9	55.7	30.9	20.3	21.2	33.2	56.7	73.5	99.1	128.3	131.7	119.2	861.7
Var. humedad (mm)	0	5.9	25.6	42.8	24.1	1.6	-27	-25	-47	0	0	0	
Ret. humedad (mm)	0	5.9	31.5	74.3	98.4	100	72.5	47	0	0	0	0	
ET real (mm)	22.6	55.7	30.9	20.3	21.2	33.2	56.7	73.5	90.5	24.2	7.6	8.9	445.4
Déficit (mm)	69.3	0	0	0	0	0	0	0	8.6	104.1	124	110.3	416.4
Excedente (mm)	0	0	0	0	0	6.7	0	0	0	0	0	0	6.7

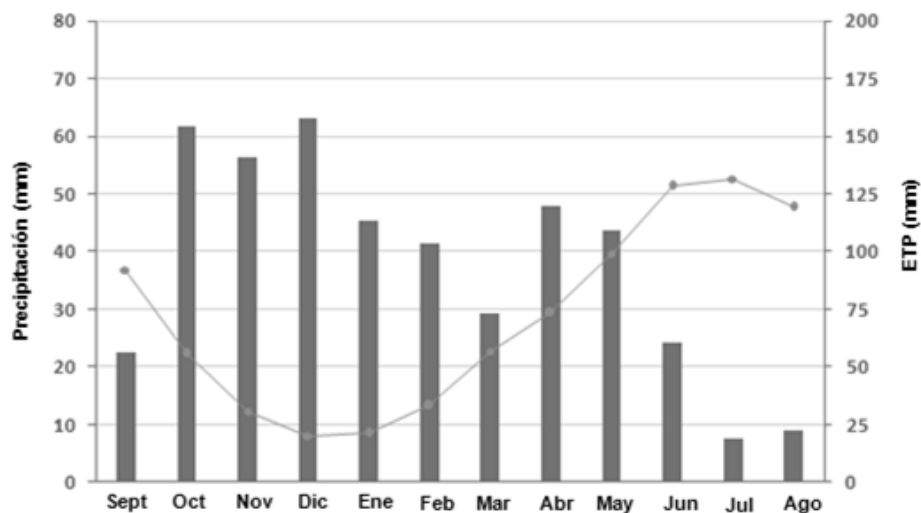


Figura 3.18: Ficha climática y balance hídrico del suelo para la serie 1975/76-2010/11 (tabla superior) y distribución de los valores medios mensuales de las precipitaciones (en columnas) y evapotranspiración potencial (ETP) (línea gris).

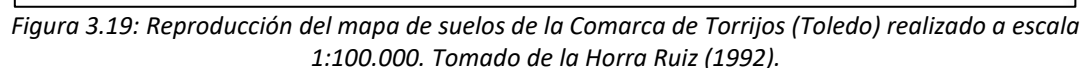
3.4.3. Edafología y usos del suelo

Los suelos característicos del área de estudio corresponden, al igual que en la Comunidad de Madrid, al tipo genérico de Suelos Pardos no Cálcicos descritos por Guerra Delgado (1968) en los depósitos sedimentarios terciarios de la región Central de España (ver 3.2.3.).

Por otro lado, en la figura 3.19 se presenta la cartografía de suelos de la comarca de Torrijos realizada por De La Horra Ruiz (1992) a escala 1:100.000. En dicho mapa, el área de estudio corresponde a las unidades cartográficas caracterizadas por presentar suelos evolucionados con horizontes Bt argílicos de acumulación de arcilla iluvial, de los tipos *Luvisol cálcico* (Lk) o *Luvisol órtico* (Lo) en función de que presenten o no horizontes cálcicos subsuperficiales. Y junto a éstos, un segundo grupo de suelos menos desarrollados de los tipos *Cambisol cálcico* (Bk) o *Cambisoleútrico* (Be), dependiendo también de la presencia o no de horizontes cálcicos.

Cuando los suelos evolucionaron a partir de sustratos de facies lutíticas, los perfiles edáficos desarrollan características vérticas dando lugar a *Vertisoles crómicos* (Vc) o *Luvisoles vérticos* (Lv) en función del grado de vertisolización, de mayor a menor respectivamente. En los coluviones arenosos situados en los tramos inferiores de las laderas y fondos de vaguadas predominan los suelos de tipo *Regosol eútrico* (Re) o *Regosoldítrico* (Rd). Por último, en los fondos de pequeñas vagas fluviales se presentan suelos del tipo *Fluvisol*, generalmente *eútrico* (Je).

Según el Mapa de Cultivos y Aprovechamientos 2000-2010 del Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA) el tipo de uso principal de la zona es el cultivo de secano, hasta el 54% de la superficie total de la Comarca de Torrijos responden a este uso. Respecto a los cultivos de secano más representativos de la zona de estudio, los cultivos



4.MATERIALES Y MÉTODOS

4.1. Introducción

Para el análisis adecuado de la erosión hídrica sobre laderas agrícolas resulta fundamental la elección del método de medida directa en campo más preciso posible, asumiendo que resulta del todo imposible una cuantificación exacta del suelo perdido por razones técnicas, cuando no por una limitación temporal del periodo disponible para la ejecución del trabajo de campo.

En este estudio solo se aborda la erosión producida por flujos concentrados: regueros y/o cárcavas efímeras, como aproximación a la pérdida total de suelo de las laderas agrícolas estudiadas. La pérdida de suelo por flujos concentrados supone el mayor porcentaje de la erosión total, variando entre el 90% (Govers y Poesen, 1988) y el 80% (Poesen et al., 1997; De Alba (1998). Estos dos últimos estudios tienen la particularidad de haberse realizado en el Sur de la Península Ibérica, en el primer caso, y en la zona centro peninsular, en el segundo, condiciones climáticas muy similares a las existentes en el presente estudio. Por lo tanto, cuantificando la pérdida de suelo por flujos concentrados se puede obtener una adecuada aproximación a los valores de la erosión total que permita determinar la importancia del fenómeno en sentido amplio.

Los volúmenes de erosión por flujos concentrados deben ser considerados como valores mínimos de pérdida de suelo por dos razones: por un lado, porque no se considera en las mediciones de campo la erosión laminar del suelo (*sheet erosion*), que podría estimarse, *a posteriori*, como el 20% de la erosión total, de acuerdo con valores presentes en la bibliografía; por otro lado, porque en las mediciones de campo de los volúmenes de los regueros y/o cárcavas efímeras únicamente se consideran los canales incididos que, además, permanecen bien definidos tras terminar el episodio erosivo (Loughran, 1989; Evans, 1995).

El objetivo final es determinar el volumen de los canales desarrollados, que es el equivalente al suelo mínimo perdido en la ladera de estudio, sin sobreestimar en ningún caso la pérdida de suelo. Esta cautela permite evaluar la gravedad de los diferentes episodios erosivos sin falsear la realidad.

El método utilizado analiza los procesos *post-factum* (De Ploey y Gabriels, 1980), consistentes en medir directamente en campo el efecto volumétrico de la erosión del suelo (rebajamientos del suelo, pedestales, volúmenes incididos...) después de que se hayan producido los procesos que los han generado. Las técnicas de medida directa en campo ofrecen la posibilidad de realizar, sin disponer de instalaciones permanentes, un elevado número de medidas y abarcar gran cantidad de ambientes respecto a tipos de suelo, posiciones fisiográficas, usos y manejos del suelo, etc. (Benito et al., 1988; Hudson, 1993; Evans, 1995 en De Alba, 1998). Dicho método *post-factum* requiere de un control o seguimiento de laderas agrícolas que cumplan los requisitos agroambientales buscados (en este caso agricultura extensiva de secano) para observar si desarrollan procesos erosivos.

Dicho seguimiento debe realizarse con mayor dedicación en periodos de alto riesgo de erosión, relacionados con el carácter de las precipitaciones existentes. En condiciones climáticas mediterráneas las precipitaciones presentan un carácter estacional bastante marcado, diferenciándose dos periodos: las precipitaciones que se producen en otoño e invierno, de las que se producen en primavera, verano e inicio del otoño (ver, por ejemplo, Alcázar, 2013).

En otoño e invierno predominan los episodios de intensidad de lluvia moderada, larga duración y elevado volumen de lluvia acumulada, que pueden denominarse como temporales. Se trata de episodios de precipitación de mayor frecuencia, con menores periodos de retorno. En los temporales, comúnmente invernales, el desencadenamiento de los episodios erosivos se produce debido a la saturación del suelo que imposibilita la infiltración del agua de precipitación,

que termina como escorrentía superficial casi en su totalidad. En estas circunstancias, el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo tiene un efecto prácticamente nulo, debido a la baja energía cinética de las gotas en este tipo de precipitación.

Por otro lado, en primavera, verano y principio del otoño, los episodios de precipitación destacan por su mayor intensidad, independientemente del volumen total de precipitación que se produzca. En estas épocas del año, los campos pueden aún estar cultivados o, si se ha realizado ya la cosecha, se encuentran cubiertos por la rastrojera, en ambas circunstancias, dicha cobertura protegería el suelo de la erosión de manera significativa. Sin embargo, si en el momento de la precipitación el campo estuviese en barbecho, comúnmente barbecho blanco, carecería totalmente de protección vegetal. En condiciones de campos desnudos, la lluvia de alta intensidad erosiona por su alta energía cinética en el impacto, que desprende partículas de suelo de pequeño tamaño que, en su movimiento, taponan una parte de la porosidad existente y reducen la capacidad de infiltración del suelo, generando una costra superficial. Este hecho produce que la práctica totalidad de la precipitación se convierta en escorrentía superficial. Este tipo de episodios de precipitación, de características tormentosas, presentan periodos de retorno más elevados que los temporales de invierno, pero pueden ser muy erosivos.

4.2. Procedimiento para la medición de la erosión por regueros y/o cárcavas efímeras

Al realizarse la investigación con un método *post-factum*, el paso previo para la cuantificación de la erosión es la localización de las laderas susceptibles de interés para el estudio. Para ello no se utilizó un método sistemático. La localización de los campos agrícolas estudiados responde a una cierta aleatoriedad, más aún cuando las tormentas, en condiciones climáticas mediterráneas, presentan una gran variabilidad espacial. Tras eventos de precipitación de cierta magnitud era inevitable localizar rasgos de erosión sobre algunas laderas agrícolas.

Las mediciones de pérdida de suelo por incisión de regueros y/o cárcavas efímeras se realizaron mediante métodos directos en campo. Se han aplicado técnicas volumétricas para establecer las pérdidas de suelo ocurridas, mediante la estimación del volumen ocupado por los distintos canales y, por lo tanto, del suelo evacuado.

Se cuantificaron los efectos erosivos ocurridos en dos escenarios contrastados, que corresponden a dos fenómenos hidrológico-erosivos diferentes, en los que se aplicaron dos métodos distintos. En campo fueron identificadas y diferenciadas a simple vista dos tipos de redes de canales por su morfología en planta: a) redes dendríticas de regueros y b) redes de regueros confinados en los surcos de labranza previos.

a) Redes dendríticas de regueros

Los regueros formados van captándose aguas abajo, de tal manera que la morfología en planta de la red de drenaje adopta forma arborescente o dendrítica (foto 4.1). El desarrollo final de la red tiende a terminar en un único reguero principal que conduce la escorrentía superficial al punto de desagüe de la cuenca. En ocasiones no concluye la red en un único canal, sino que lo hace en varios. Esto indica, entre otros factores, que la red no ha dispuesto de tiempo o superficie suficiente para un desarrollo completo y maduro. Las características de la superficie también juegan un papel importante en el desarrollo de la red: una morfología cóncava en la cuenca de drenaje producirá una mayor convergencia de los canales, mientras que una superficie plana, producirá un mayor número de canales finales. La sección del canal o canales principales va creciendo aguas abajo por los aportes laterales desde los distintos tributarios que convergen en él, lo que le proporciona una mayor capacidad erosiva aguas abajo.



Foto 4.1: Dos ejemplos de redes dendríticas de regueros en Paracuellos del Jarama (Madrid).

b) Redes de regueros confinados en los surcos de labranza

La morfología en planta de los regueros dibuja una serie de canales más o menos paralelos entre sí y con escasas o nulas confluencias (foto 4.2). Esta morfología se produce allí donde la dirección de laboreo es a favor de la máxima pendiente o próxima a esta. En estas circunstancias, el agua de la precipitación no encuentra barreras físicas sobre el terreno y, si no se infiltra en el terreno, fluye ladera abajo a favor de los surcos de labor que actúan a modo de microcuencas hídricas. Cuando el caudal es suficiente para superar el esfuerzo cortante crítico del suelo, el agua sobreexcava el fondo del surco dibujando un reguero. Potencialmente pueden desarrollarse tantos canales como surcos de labor existan previamente y su longitud potencial máxima es la de estos.

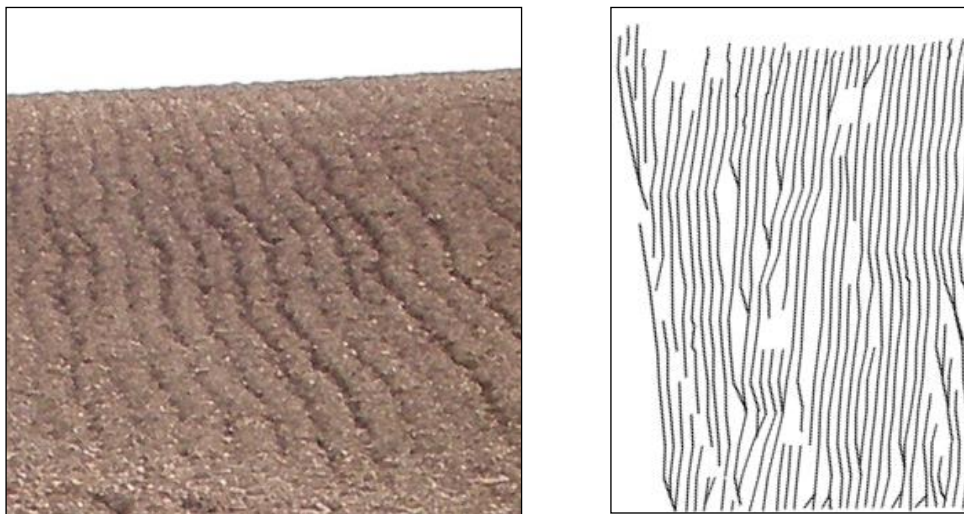


Foto 4.2: Ejemplo de regueros confinados.

A la izquierda, ladera agrícola de Paracuellos del Jarama con desarrollo de regueros confinados. A primera vista pueden parecer solo los surcos de labor sobre el campo de labor, sin embargo, se encuentran sobreexcavados. A la derecha, esquema en planta de los regueros una vez cartografiados. Se aprecia la falta de conectividad entre ellos, pudiendo individualizarse casi tantas microcuencas como surcos de labor previos.

Junto a estos dos modelos de reguerización o acaravamiento de las laderas agrícolas, existe un tercero: el desarrollo de cárcavas a favor de la existencia de un fondo de vaguada. En este caso, la concentración de agua de escorrentía a favor de una línea de drenaje natural de un campo agrícola produce el desarrollo de un canal, que en ocasiones adopta grandes dimensiones, pudiendo llegar a ser una cárcava efímera, e incluso permanente (foto 4.3).



Foto 4.3: Canal de fondo de vaguada en Arroyomolinos. En la fotografía puede apreciarse el cambio de la dirección de la pendiente de las laderas que definen una línea de drenaje en el fondo de la vaguada por la cual se ha desarrollado una cárcava efímera.

El protocolo de trabajo seguido para el estudio de las laderas seleccionadas comprende los siguientes apartados.

4.2.1. Levantamiento topográfico de detalle de la ladera afectada por los sistemas de regueros y/o cárcavas y delimitación de las microcuencas de drenaje

Después de cada uno de los eventos de precipitación desencadenantes de los rasgos erosivos, una vez localizadas las laderas de interés para el estudio, se realizaron levantamientos topográficos de detalle de la ladera o laderas afectadas por la erosión. Para este estudio se utilizaron tanto una estación total modelo PENTAX R-315N®, como un GPS diferencial modelo LEICA 1200® (foto 4.4). A partir de los levantamientos topográficos realizados, se elaboraron Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) mediante la utilización del *software Surfer 10®* (figura 4.1), para conseguir dos objetivos fundamentales:

- a) Identificar y caracterizar la unidad hidrológica de cada ladera agrícola.
- b) Obtener las diferentes variables topográficas de las áreas de estudio.



Foto 4.4: Estación Total R-315N (izquierda) y GPS diferencial modelo LEICA 1200® (derecha).

También se midió en campo la rugosidad orientada en cada una de las laderas de estudio. La rugosidad orientada hace referencia al ángulo que forma la dirección de los surcos de labranza con la dirección de la máxima pendiente. Como convenio para todo el trabajo se ha determinado un ángulo de 0° allí donde la dirección de los surcos de labranza y la máxima pendiente siguen la misma dirección, o lo que es lo mismo, allí donde el laboreo es a favor de la máxima pendiente. Este valor permite, *a posteriori*, determinar la influencia de la rugosidad orientada en los diferentes modelos erosivos desarrollados.

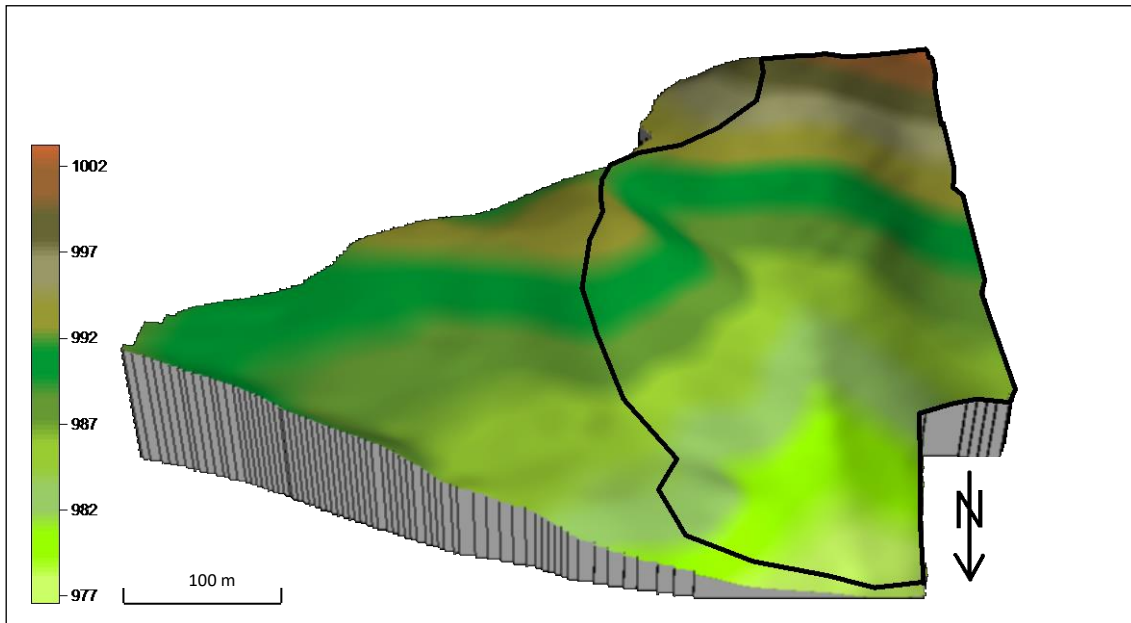


Figura 4.1 Ejemplo de MDE de una de las laderas estudiadas en Arroyomolinos (Madrid). La línea negra muestra el límite de la zona de estudio, se trata de los límites de la cuenca hidrológica. La escala se presenta en metros.

Una vez caracterizada la totalidad de la ladera agrícola, se individualizan los sistemas de regueros y/o cárcavas efímeras y se delimitan las cuencas de drenaje (microcuencas) correspondientes de cada uno de ellos.

4.2.2. Cartografía de las redes de regueros y/o cárcavas efímeras

Se ha determinado el suelo perdido a través de la cuantificación del volumen ocupado por los canales, utilizando el método de las secciones transversales.

Los métodos basados en la toma de medidas de una serie de secciones transversales en puntos estratégicos a lo largo de los regueros o cárcavas efímeras, bien con un perfilador microtopográfico, bien con una cinta métrica, han sido y siguen siendo los más utilizados (ver, por ejemplo, Spomer y Hjelmfelt, 1986; Govers, 1987; Govers y Poesen, 1988; Govers, 1991; Auzet et al., 1993; Smith, 1993; Ludwig et al., 1995; Vandaele y Poesen, 1995; De Alba, 1997; Casalí et al., 1999; Bennett et al., 2000; De Santisteban et al., 2004, Casalí, 2006).

Las características de los cauces que se forman dentro de las microcuencas determina el método de medición de dichas secciones transversales. Según Casalí (2006), utilizar técnicas diferentes a la del microperfilador para determinar la superficie de las secciones transversales de canal puede producir fácilmente valores de error superiores al 10%, incluso a partir de numerosas secciones transversales de canal por unidad de longitud, y para canales muy uniformes y aparentemente casi prismáticos. Pese a estos datos, para este trabajo no se ha utilizado el microperfilador. Se han medido las diferentes secciones transversales con cinta métrica. Se

determinó el uso de la cinta métrica debido a las importantes longitudes de canal presentes en las redes de canales que debían ser caracterizadas, lo cual obligaba a la medición de un elevado número de secciones transversales, siendo la cinta métrica el único instrumento que hacía viable dicho trabajo con una inversión temporal razonable. Ante estas circunstancias, la utilización del microperfilador hubiese complicado de manera notable el trabajo de campo, sino imposibilitado directamente el trabajo.

Junto a la determinación de la cinta métrica como instrumento de medida se realizó una asunción de partida para la medición de las secciones transversales. Debido a que los regueros presentaron una sección predominante en forma de U o V, se asumió que los canales presentaban una geometría trapezoidal. De esta manera fueron medidas en cada una de las secciones transversales: la anchura de la incisión, en la parte superior e inferior, y la profundidad del canal (figura 4.2).

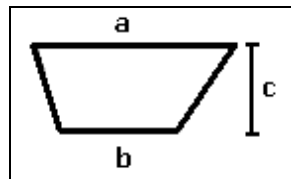


Figura 4.2: Esquema de la toma de medidas de las secciones del canal, siendo *a*: anchura superior del canal; *b*: anchura base del canal; y *c*: altura entre la parte superior y la inferior del canal.

En los casos en los que las secciones presentaron una morfología compleja, es decir, con más de una sección superpuesta (un segundo pulso de profundización modela una doble sección, una sobre otra) (figura 4.3) se midió cada una individualmente, para posteriormente adicionar las dos superficies.

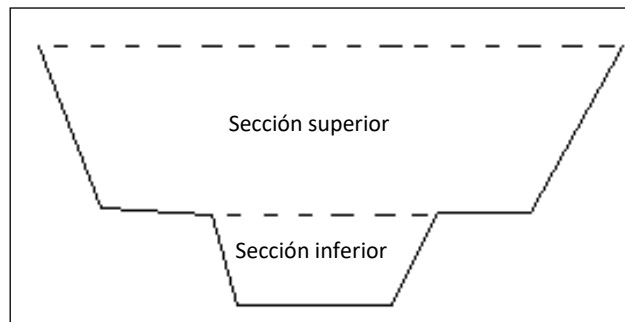


Figura 4.3: Perfil de una sección transversal compleja de un reguero. En este caso se miden en el campo como secciones individuales, superior e inferior, para luego sumarse y obtener el área de la sección completa.

Hay que considerar de partida, que la reproducción exacta de la morfología del canal es inviable, por razones tecnológicas y temporales, cuando no económicas. La elección de un trapezoide como la mejor de las aproximaciones a la morfología real del canal introduce un error que debe ser asumido por el procedimiento. En la exactitud de las medidas tomadas tiene una enorme influencia la densidad de las secciones transversales por unidad de longitud de canal y la forma del mismo, cuya mayor o menor complejidad facilitará un dato más o menos próximo a la realidad. Una vez determinado el método de medición de las diferentes secciones transversales resulta fundamental determinar la distribución de las secciones transversales sobre la red de estudio. Para ello es imprescindible conocer si se está ante una red dendrítica de regueros o ante una red de regueros confinados. Se trata de un procedimiento simple y que puede realizarse a simple vista, en función del cual se determina el método de distribución de las secciones transversales sobre los sistemas de regueros y el posterior procedimiento de cálculo de los volúmenes de suelo desalojados.

4.2.2.1. Distribución de las secciones transversales sobre las redes dendríticas de regueros

El procedimiento de distribución de las secciones transversales sobre las redes dendríticas de regueros conjuga una parte sistemática con una cierta arbitrariedad en la toma de decisiones sobre los lugares dónde situar las diferentes secciones transversales.

Para llevar a cabo este procedimiento, el primer punto de referencia son las confluencias entre canales y el segundo son los tramos de canal entre confluencias.

Son las confluencias los lugares en los que se produce un mayor cambio en las secciones de los canales. En cada confluencia se medirán hasta 3 secciones transversales: dos aguas arriba de la confluencia, una sobre cada uno de los canales que confluyen, y una tercera inmediatamente después de la confluencia, aguas abajo (figura 4.4). Donde situar con exactitud las secciones transversales sobre el cauce es función del observador, ya que las zonas de confluencia suelen estar sujetas a procesos como derrumbes de las paredes de los canales, entre otros, y resulta importante no medir secciones de reguero no representativas.

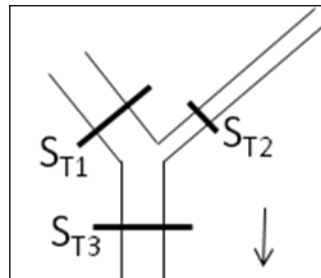


Figura 4.4: Esquema de una confluencia entre regueros y la posición de las diferentes secciones transversales (S_T) en la misma. La flecha indica la dirección del flujo.

En segundo lugar, este procedimiento requiere de la medición de un número de secciones transversales entre confluencias. El criterio seguido para elegir la ubicación de las secciones es la variabilidad de la morfología del canal, de forma que, medida una sección, la siguiente medida se toma en un punto del cauce donde se aprecia un cambio morfológico importante que deberá ser determinado por el observador sobre la base de su experiencia y pericia. En ningún caso, la separación entre secciones será superior a 5 metros.

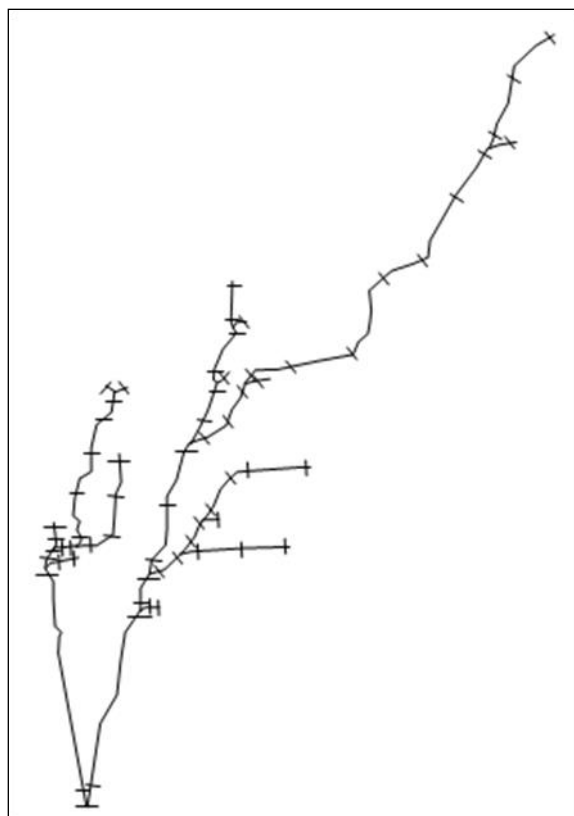
Este método, que combina una toma de secciones transversales sistemática con otra arbitraria, a criterio del observador, se realiza con objeto de optimizar la toma de datos respecto al tiempo invertido, en función de la complejidad de la red.

Resulta recomendable, para no dejar de cartografiar ningún canal, que la toma de datos se realice en sentido ascendente de la ladera, de tal manera que se parte desde el punto de desagüe de la red y se van encontrando las diversas confluencias de los canales, según se asciende por la ladera hasta llegar a la cabecera de la red (figura 4.5).

Dentro de este procedimiento, a la medición del área de las secciones del canal, se une la toma de la posición de cada una de las secciones mediante el uso de un GPS diferencial o estación total, para realizar, *a posteriori*, la cartografía de las redes de regueros.

Este procedimiento de distribución de las secciones transversales sobre las redes dendríticas de regueros ha sido denominado como el Método de la Nube de Puntos (MNP).

Figura 4.5: Esquema de la cartografía de una red dendrítica de regueros. En la misma puede observarse la posición de las secciones transversales medidas.



4.2.2.2. Distribución de las secciones transversales sobre las redes de regueros confinados

Se trata de un procedimiento sistemático, en el que la única dificultad es diferenciar la morfología del reguero formado con la del surco de labranza que existía previamente, para no incluir un surco de labranza como un canal de erosión.

En este caso, la distribución de las secciones transversales se hace a lo largo de transectos de control. Un transecto es un segmento rectilíneo que cruza la red de regueros perpendicularmente a la dirección de los mismos, de un lateral al otro de la microcuenca considerada. Los transectos se trazan paralelos entre sí a una equidistancia previamente definida (figura 4.7).

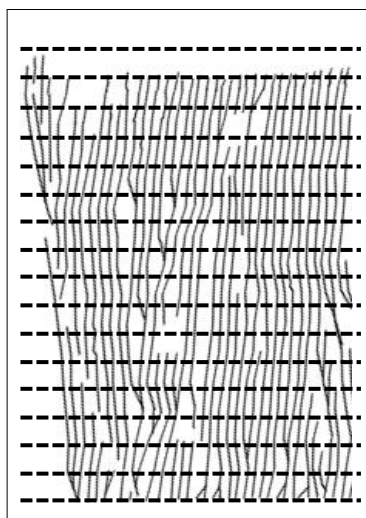


Figura 4.7: Esquema de la cartografía de una red de regueros confinados de Paracuellos del Jarama. En la misma puede observarse la posición de los transectos en trazo discontinuo.

En cada punto de intersección del transecto con los canales se toma la posición del reguero, mediante GPS o estación total, y se mide el área de la sección transversal correspondiente. En los casos presentados en este trabajo se han considerado 5 m de equidistancia oblicua, distancia considerada sobre la propia ladera, entre transectos, si bien esta decisión es arbitraria.

A la hora de medir la sección transversal de los canales se mide la suma del surco previo y el reguero. Posteriormente hay que eliminar la superficie que corresponde al surco previo de la superficie erosionada, sustrayéndola a la incisión del canal. Para ello se deben conocer las dimensiones del surco de labranza en origen, midiéndolas en áreas que no hayan sido erosionadas.

Este procedimiento de distribución de las secciones transversales sobre las redes de regueros confinados ha sido denominado como el Método de los Transectos equidistantes según Distancias oblicuas considerando Longitudes equivalentes (MTD-Le).

4.2.3. Cuantificación del volumen de suelo perdido

El objetivo de este procedimiento es determinar el volumen ocupado por los regueros, que es equivalente al volumen mínimo de suelo que ha sido desalojado. Para ello se utiliza la fórmula de cálculo del área del trapecoide (eq. 4.1) que permite determinar la superficie de cada una de las secciones transversales a partir de las medidas obtenidas en campo.

$$A = [(a + b) / 2] * c \quad (\text{eq. 4.1})$$

Siendo: A, el área de la sección transversal considerada; a, la anchura del canal en su parte superior; b, la anchura de la base del canal; c, la altura del canal.

Conocidas las superficies de las secciones de los canales, se procede a cubicar el volumen total de pérdida de suelo. El procedimiento es ligeramente diferente según si se aplica para una red dendrítica de regueros o para una red de regueros confinados, aunque en ambos casos es imprescindible considerar las distancias entre secciones (L) (figura 4.8).

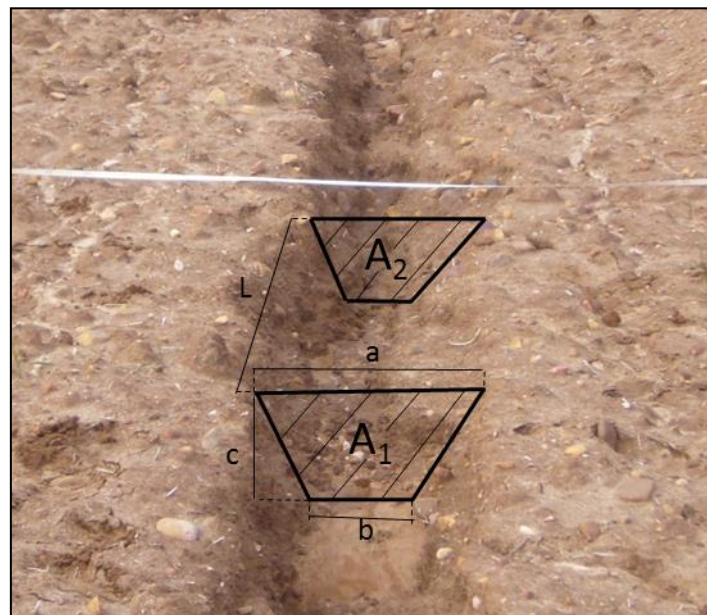


Figura 4.8: Ejemplo de dos secciones de canal medidas en campo en las cuales se indican los valores tomados (a, b y c). A partir de las medidas obtenidas en el campo se calcula el área (A) de cada una de las secciones y conociendo la distancia entre ellas (L) el volumen total ocupado por el canal. El ejemplo es de un canal de fondo de vaguada de Paracuellos del Jarama.

En el caso de las redes dendríticas de regueros, las distancias entre secciones (L) se calculan a partir de los datos de posición adquiridos mediante GPS o estación total. Para cubicar el volumen ocupado por los regueros se determina el área media existente entre cada par de secciones consecutivas y se multiplica por la longitud existente entre ambas secciones, realizando esta operación para cada uno de los sub-tramos en que se han dividido los canales (eq. 4.2).

$$V_T = \sum V_s = (\sum S_n + \sum S_{n+1})/2 * L_{AN} \quad (\text{eq. 4.2})$$

Siendo V_s : volumen de suelo perdido correspondiente a la superficie entre dos secciones transversales consecutivas; S_n : secciones n ; L : longitud entre dos secciones transversales consecutivas n y $n+1$; V_T : Volumen total de suelo perdido.

El resultado final del procedimiento es la obtención de la cartografía de la red de regueros dendríticos estudiada, junto a la cuantificación del volumen de suelo total perdido por flujos concentrados (figura 4.9).

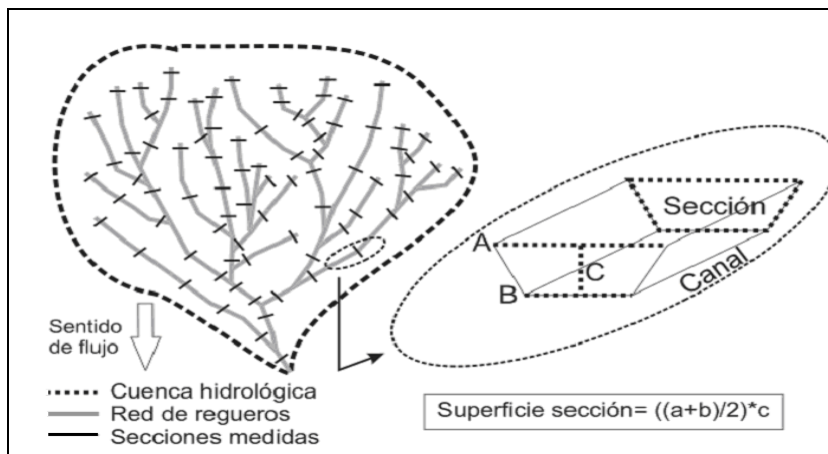


Figura 4.9: Diagrama representativo de una cuenca de drenaje con desarrollo de regueros dendríticos. Detalle de una sección del canal con los parámetros medidos y la ecuación que ofrece la superficie de la sección.

En el caso de los regueros confinados, al utilizarse transectos para la medición de las secciones transversales, se hace una simplificación para el cálculo, simulando la existencia de un canal único (figura 4.10). Esto se hace porque se considera que los regueros son *quasi* rectilíneos (como lo son los surcos de labranza) y, por tanto, la distancia del reguero de un transecto a otro se toma como la distancia entre transectos utilizada y porque apenas existen capturas entre regueros dentro de la red. El cálculo se realiza sumando las áreas de todos los regueros situados sobre el mismo transecto. De esa manera se obtiene una superficie total de los regueros sobre cada uno de los transectos. Llegado a este punto el procedimiento es equivalente al anterior, calculando una superficie media entre dos secciones consecutivas y multiplicándolo por la longitud existente entre las mismas. En este caso, la longitud entre secciones es constante, la determinada previamente.

El volumen total de suelo perdido se obtiene por adicción de todos los volúmenes parciales entre transectos (eq. 4.3).

$$V_T = \sum V_s = (\sum S_{Ti} + \sum S_{Ti+1})/2 * L \quad (\text{eq. 4.3})$$

Siendo V_s : volumen de suelo perdido correspondiente a la superficie entre dos transectos consecutivos; S_{Ti} : secciones del transecto i ; L : longitud entre dos transectos consecutivos; V_T : Volumen total de suelo perdido.

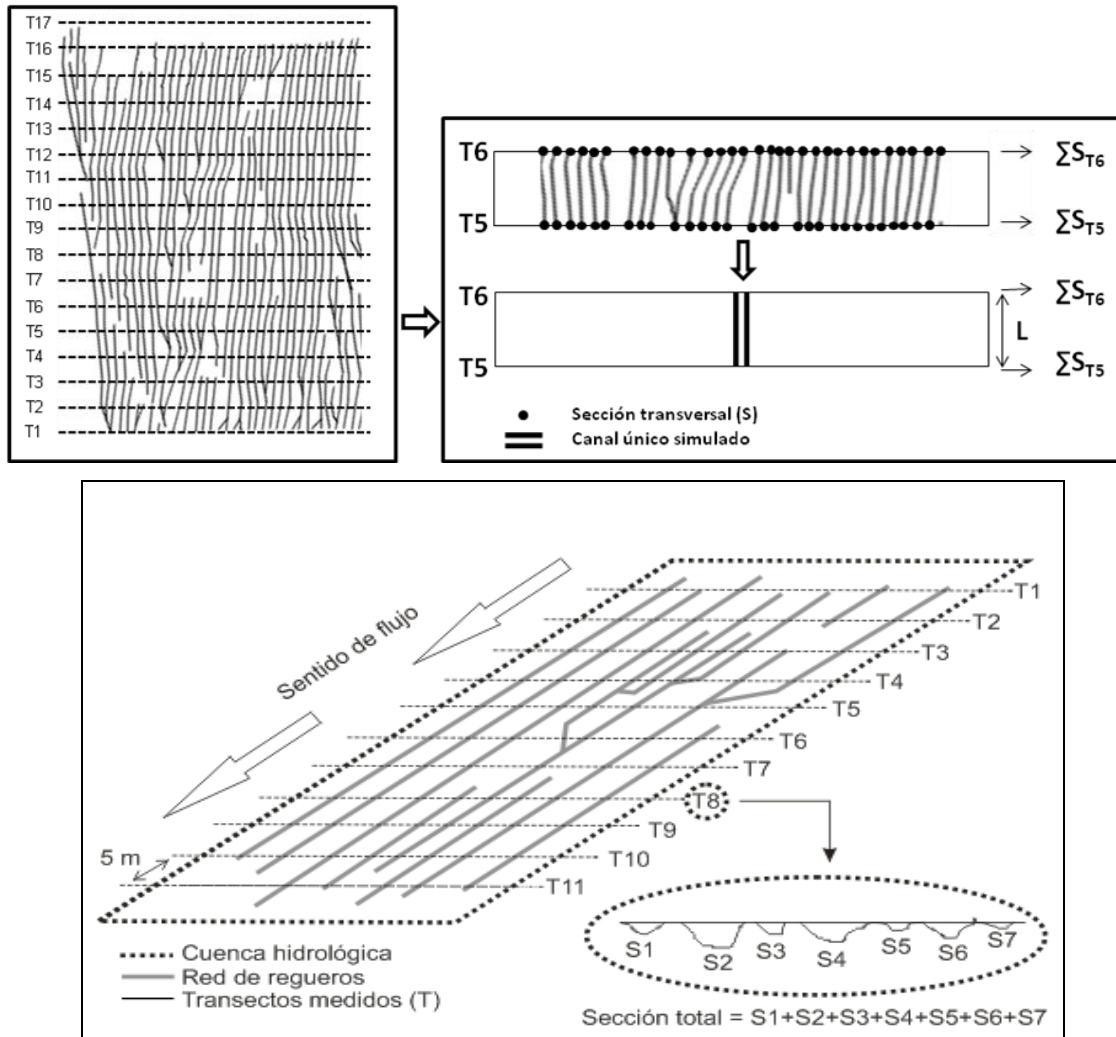


Figura 4.10: Dos ejemplos diferentes de microcuencas con desarrollo de regueros confinados. En ambas microcuencas se ha superpuesto el trazo de los transectos. El sumatorio de todas las secciones intersectadas por cada transecto simula la existencia de un canal único. La longitud entre secciones consecutivas de un canal es la longitud entre transectos.

4.3. Determinación de las propiedades físicas y químicas de los suelos de estudio

Para el estudio de las propiedades del suelo se realizaron diversos muestreos en cada una de las laderas agrícolas donde se cuantificaron rasgos de erosión. En todas ellas se realizó una descripción morfológica y muestreo del perfil del suelo presente en el área de estudio, así como el análisis de la variabilidad espacial de las distintas propiedades físicas y químicas del mismo en la capa superficial de labor (hasta 20 cm de profundidad). El motivo de que las muestras abarquen los primeros 20 cm del suelo se debe a que estos primeros centímetros de profundidad son los afectados tanto por el laboreo desarrollado como por las incisiones erosivas y, por tanto, serán las características de estos primeros centímetros las que condicionarán los rasgos morfológicos de los canales.

4.3.1. Métodos de análisis de las propiedades físicas del suelo

4.3.1.1. Descripción morfológica y clasificación de los perfiles del suelo

La descripción morfológica se realizó de acuerdo con la “Guía para la descripción de perfiles de suelo de la FAO” (FAO, 1977). Para la identificación de los colores se utilizó la “Carta de colores del suelo Munsell” (1975). Respecto al sistema de clasificación para la asignación de las distintas

propiedades y horizontes de diagnóstico, así como del tipo de suelo, se hizo uso de las clasificaciones de suelos de la FAO (1989) y *Soil Taxonomy* (Soil Survey Staff, 1990).

4.3.1.2. Análisis granulométrico y textural

El análisis granulométrico se realizó mediante el método de la pipeta de Robinson (1922), considerando el factor de corrección de los tiempos de sedimentación en función de la temperatura (Day, 1965) y a partir de muestras de suelo secado al aire y pasado por el tamiz de 2 mm. Las muestras de suelo fueron tratadas previamente con peróxido de hidrógeno, con objeto de eliminar la materia orgánica, y con una disolución de hexametafosfato sódico para dispersar los complejos órgano-minerales. Se determinaron los porcentajes en peso que corresponden a las distintas clases de tamaños de partículas con el sistema USDA. Igualmente se realizó con las clases de texturas, que corresponden al sistema de clasificación de la USDA (ver, por ejemplo, Soil Survey Staff, 1990)

4.3.1.3. Densidad aparente

La densidad aparente del suelo ρ_a (g cm^{-3}) es la relación entre el peso y el volumen de una muestra no alterada de suelo. Se determinó a partir de muestras de suelo sin alterar, tomadas mediante cilindros de volumen conocido y próximo a 125 cm^3 . La densidad se obtiene mediante el cociente del peso de la muestra de suelo, después de secarla en estufa a 105°C durante 24 h, y el volumen interior del cilindro.

4.3.2. **Métodos de análisis de las propiedades químicas del suelo**

4.3.2.1. pH y conductividad eléctrica

Se realizaron medidas de pH y conductividad eléctrica en agua. Para la determinación del pH y la conductividad eléctrica en agua se utilizó una suspensión de suelo, seco y tamizado por el tamiz de 2 mm, en agua desionizada en una relación suelo/agua de 1 a 2.5. Para las medidas del pH y la conductividad eléctrica del suelo se utilizó el pH-metro *Crison, Ph-meter basic 20* y el conductímetro *Crison, basic 30*.

4.3.2.2. Materia orgánica

Se ha determinado por el procedimiento de Walkley-Black (ver, por ejemplo, Nelson y Sommers, 1996 en Apezteguia et al., 2000). El método se aplica a partir de muestras de suelo seco, tamizado en 2 mm y molido en un mortero de ágata.

4.3.2.3. Carbonatos totales

La valoración de la presencia de carbonatos en las diferentes muestras analizadas se realizó de forma cualitativa, mediante la aplicación sobre la muestra de HCl diluido al 11% y la comprobación de la efervescencia o no de la misma.

4.3.2.4. Cationes de cambio y capacidad de intercambio catiónico

La capacidad de intercambio catiónica (CIC) se realizó aplicando el procedimiento recomendado en el Manual: "Métodos Oficiales de Análisis" (MAPA, 1994) a partir de una muestra de 10 g de suelo tamizada por el tamiz de 2 mm y lavada durante 3 horas de agitación con agua destilada. Por otro lado, los cationes de cambio Ca^{2+} , K^+ y Na^+ se determinaron por fotometría de llama (ver, por ejemplo, Van Reeuwijk, 1987) con un espectrofotómetro *Eppendorf* y el Mg^{2+} mediante un espectrofotómetro de absorción atómica *Perkin-Almer 403*.

4.4. Caracterización de la precipitación desencadenante de los episodios de erosión y análisis de frecuencia

Tratándose de un estudio *post-factum*, es decir, no se monitorizan previamente campos de cultivo de interés, sino que se estudian aquellos donde se han desarrollado rasgos erosivos —y que son localizados después de los eventos de precipitación desencadenantes de la erosión—, resulta imposible tener un registro pluviográfico propio de los campos de cultivo estudiados. Los datos se obtienen de las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio en cada caso, normalmente de la red de estaciones del AEMET (Agencia Estatal de Meteorología). Las características propias de las precipitaciones en condiciones climáticas mediterráneas, en donde la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones es muy elevada, especialmente en condiciones tormentosas, hacen que la distancia existente entre el origen de los datos meteorológicos y la zona de aplicación pueda aportar una importante incertidumbre. Sin embargo, el procedimiento de trabajo impide hacerlo de otra manera, y el posible error debe ser asumido como intrínseco a la metodología aplicada.

Con objeto de caracterizar y estimar los periodos de recurrencia de las precipitaciones desencadenantes de los episodios erosivos producidos en las diferentes laderas de estudio se llevó a cabo un análisis de frecuencia aplicando la Ley de Gumbel (ver, por ejemplo, Mutreja, 1990) para la distribución de valores extremos. Para ello se ha dispuesto en cada caso de los datos de precipitaciones acumuladas en 24 h (P_{24}) de la estación meteorológica más cercana y para la serie temporal más longeva posible. Una vez se adquirieron estos datos, se aplicó el modelo CHAC (Calculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas), elaborado por el CEDEX, para la serie temporal de que se dispuso en cada caso.

Los resultados del análisis se representan de forma gráfica en cada caso (figura 4.11). Sobre la línea de tendencia habría que situar las características de la precipitación estudiada, en mm, para obtener el periodo de retorno.

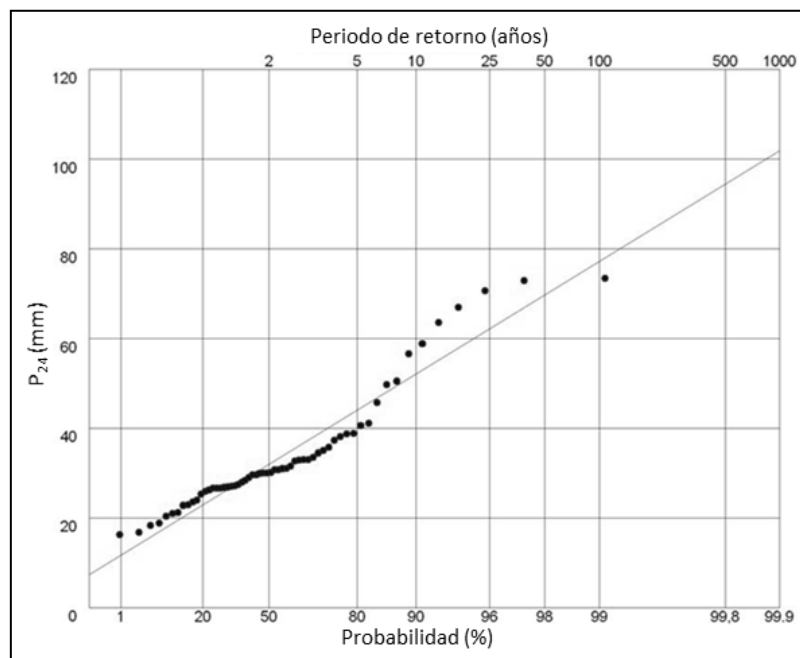


Figura 4.11: Análisis de frecuencia de episodios extremos, en este caso el ejemplo es de Paracuellos del Jarama. En el eje superior se indican los periodos de retorno para episodios con precipitaciones acumuladas en 24 h, P_{24} , y en el eje inferior la probabilidad de que en un año dado no se produzca una precipitación superior a P_{24} .

**5. CARACTERIZACIÓN Y CUANTIFICACIÓN
DE EPISODIOS EROSIVOS SOBRE
SUELOS AGRÍCOLAS DE LA ZONA
CENTRAL DE ESPAÑA**

5.1 Introducción

El presente capítulo está dedicado al estudio de los efectos erosivos de hasta once episodios de precipitación de intensidad variable que desencadenaron procesos de reguerización y acarcavamiento sobre campos de agricultura extensiva de secano en condiciones climáticas mediterráneas.

Para ello, se ha caracterizado y cuantificado un total de cuarenta y tres cuencas hidrológicas de pequeño tamaño (en adelante microcuencas) con rasgos de erosión por regueros y/o cárcavas efímeras y cinco microcuencas más que, sin presentar rasgos de erosión, tenían características similares a aquellas en cuales se había producido incisión de canales. El objetivo de la caracterización de las cinco microcuencas sin incisiones es el de utilizarlas como referencia en la búsqueda de umbrales que determinen el desencadenamiento del proceso erosivo.

En todos los casos se ha cuantificado la pérdida de suelo producida por la incisión de regueros y/o cárcavas efímeras. Como ya se presentó en el apartado 2.3 de este mismo trabajo, la erosión por flujos concentrados supone un elevado porcentaje de la erosión total en los campos cultivados. En este caso se considerará la erosión laminar como un 20% del valor total de la erosión, valor publicado para condiciones ambientales mediterráneas por Poesen et al. (1997), y respaldado por De Alba (1998). Por lo tanto, se pueden estimar las pérdidas de suelo por erosión laminar a partir de las cifras de erosión por flujos concentrados obtenidas por medición directa en campo. Estos valores, unidos al análisis de frecuencia del episodio de precipitación desencadenante del proceso erosivo, permitirán evaluar la importancia de la erosión del suelo producida en cada uno de los casos, considerando, para esta comparación, los valores máximos de pérdida tolerable de suelo (T) (SCS, 1973 y Moreira, 1991).

Dentro de la descripción de las características de cada una de las microcuencas: topográficas, edafológicas, etc., se prestará especial atención al papel que desempeña la rugosidad orientada (dirección de laboreo) sobre la hidrología superficial de las laderas cultivadas, configurando las líneas de flujo superficial y los patrones de distribución espacial de las zonas de concentración de escorrentía en las laderas.

Para completar el análisis de los episodios erosivos caracterizados en su totalidad dentro de esta Tesis y dotar la base de datos y las conclusiones de este estudio de mayor robustez, se han incluido en este trabajo algunos de los episodios erosivos caracterizados dentro del proyecto de investigación MANERO financiado por el Plan Nacional de I+D+I 2004-07 (MEC). Se trata de hasta cinco episodios erosivos que fueron caracterizados entre los años 2004 y 2006 en las localidades de Cebolla, Pedro Muñoz, Valdepeñas, Santa Olalla y Hormigos. De los cinco episodios erosivos apenas se cuenta con la información existente en la Memoria Técnica del Informe Final del Proyecto MANERO (2008). También se ha incluido junto a los anteriores, un episodio erosivo caracterizado en la localidad de Rielves (Toledo), que se encuentra descrito con detalle en De Alba (1998).

5.2 Caracterización y cuantificación de los episodios erosivos

5.2.1. Episodio erosivo en Arroyomolinos, Madrid

5.2.1.1. Descripción del área de estudio

5.2.1.1.1. Marco fisiográfico

El municipio de Arroyomolinos se sitúa a unos 30 km al Suroeste de la ciudad de Madrid y cuenta con una población en torno a los 16.000 habitantes (figura 5.1). El término municipal se encuentra parcialmente incluido en el Parque Regional del curso medio del río Guadarrama y su entorno. Se trata de una zona compuesta por colinas, relieves suavemente alomados con pendientes moderadas, en su mayoría entre un 5 y un 15%, y que solo presenta áreas mayoritariamente llanas en las vegas de los arroyos. De las 9557 ha que constituyen el término municipal, pertenecientes a la Comarca Agraria Suroccidental dentro de la Comunidad de Madrid, un total de 3308 ha (34.6%) son tierras labradas, de las cuales 2105 ha (63.3%) son cultivos herbáceos, mayoritariamente de secano y 1203 ha (36.3%) corresponden a cultivos leñosos (frutales, olivos y vid). El área forestal del municipio comprende 1450 ha (15.1%) y el resto, 232 ha (2.4%), se han caracterizado como otras tierras no forestales (Censo Agrario del Instituto Nacional de Estadística, 2009).



Figura 5.1: Situación de Arroyomolinos dentro de la Comunidad de Madrid.
Modificado de <https://wikipedia.org>

Los dos campos agrícolas en los que ha sido realizado el estudio, y que en adelante se denominaran como Ay-1 y Ay-2, están situados en el Cerro de las Cabezas, limitado por el Barranco de las Cabezas al Oeste y la Carretera A-5 al Este (figura 5.2). Ambos campos agrícolas se sitúan en la parte más nororiental del término municipal, en el límite con el término municipal de Móstoles. La ladera de estudio Ay-1 tiene una superficie total de 92207 m², mientras en el caso de Ay-2 dicha superficie llega hasta los 158742 m².



Figura 5.2: Situación de los dos campos agrícolas de estudio, Ay-1 (1) y Ay-2 (2), y de la autovía A-5 a su paso entre las localidades de Arroyomolinos y Móstoles. La rotonda intermedia entre ambas parcelas (3) se sitúa a $40^{\circ} 18' 2.54''$ N de latitud y $3^{\circ} 54' 24.88''$ W de longitud. Fuente: Visor SIG-PAC. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA).

5.2.1.1.2. Edafología y usos del suelo

Para la caracterización del suelo de los dos campos agrícolas de estudio se describió un perfil del mismo, a cuya información se añadieron doce muestras de superficie (primeros 20 cm del perfil del suelo), seis muestras repartidas sobre la superficie de cada una de las laderas estudiadas. Las tablas 5.1 y 5.2 resumen las principales características físico-químicas de los suelos de estos dos campos agrícolas.

Tabla 5.1: Propiedades físicas de los suelos muestreados en las laderas de Arroyomolinos. Los datos se refieren al horizonte superficial (20 cm).
a: arena (2-0.05 mm); l: limo (0.05-0.002 mm); arc: arcilla (< 0.002 mm). ρ_a : densidad aparente.

Campo	Punto de muestreo	a (%)	l (%)	Arc (%)	Textura (USDA)	ρ_a (gr cm ⁻³)
Ay-1	1.1	81	9.5	9.5	Arena franca	1.39
Ay-1	1.2	71.5	13	15.5	Franco arenosa	1.39
Ay-1	1.3	61.5	17	21.5	Franco arcillo-arenosa	1.61
Ay-1	1.4	57.5	16	26.5	Franco arcillo-arenosa	1.33
Ay-1	1.5	77	6.5	16.5	Franco arenosa	1.37
Ay-1	1.6	77	11.5	11.5	Franco arenosa	1.39
Ay-2	2.1	78.5	10.5	11	Franco arenosa	1.43
Ay-2	2.2	83.5	9	7.5	Arena franca	1.54
Ay-2	2.3	70	13	17	Franco arenosa	1.43
Ay-2	2.4	83	7	10	Arena franca	1.39
Ay-2	2.5	88	5.5	6.5	Arena franca	1.47
Ay-2	2.6	72	13.5	14.5	Franco arenosa	1.45

Tabla 5.2: Propiedades químicas de los suelos muestreados en las laderas de Arroyomolinos. Los datos se refieren al horizonte superficial (20 cm). Solo se han analizado los cationes de cambio en una de las muestras para cada una de las laderas.

MO: materia orgánica. CE: conductividad eléctrica. CIC: Capacidad de intercambio catiónico. RAS: Relación de adsorción de sodio.

Campo	Punto de muestreo	MO (%)	pH	CE (dS/m)
Ay-1	1.1	0.45	5.87	0.068
Ay-1	1.2	0.70	6.36	0.102
Ay-1	1.3	1.09	6.21	0.068
Ay-1	1.4	0.83	6.30	0.073
Ay-1	1.5	0.72	6.31	0.072
Ay-1	1.6	0.55	5.77	0.074
Ay-2	2.1	1.50	6.15	0.033
Ay-2	2.2	0.58	6.24	0.034
Ay-2	2.3	0.84	6.61	0.043
Ay-2	2.4	0.49	6.27	0.038
Ay-2	2.5	0.43	6.68	0.035
Ay-2	2.6	0.91	6.57	0.044

Campo	Ca ²⁺ (cmol/Kg)	Mg ²⁺ (cmol/Kg)	Na ⁺ (cmol/Kg)	K ⁺ (cmol/Kg)	CIC (cmol/Kg)	RAS
Ay-1	0.37	0.97	0.13	0.37	10.36	0.16
Ay-2	4.07	0.9	0.15	0.23	8.3	0.09

El material del suelo, que tiene su origen en las arcosas procedentes de la erosión de los granitos y rocas metamórficas de la Sierra de Guadarrama, presentó un bajo contenido en materia orgánica, apenas 0.75%, poca pedregosidad en superficie y una estructura que le hace ser un suelo moderadamente bien drenado, encontrándose humedad por debajo de los 30-40 cm de profundidad. La capa freática se sitúa en esta zona de estudio por debajo de los dos metros. Una descripción sintética del perfil del suelo puede verse en la tabla 5.3. Se trata de un suelo eminentemente agrícola, muy alterado por la acción humana y con muchos rasgos de estar sometido a una fuerte erosión. En la imagen de la figura 5.2 pueden apreciarse manchas de color claro que anuncian la existencia de perfiles truncados, con horizontes subsuperficiales que quedan expuestos en superficie por la erosión.

Cabe destacar que la textura del suelo es arenosa, entre franco arenosa y arena franca. En Ay-1, en uno de los lados del campo existen contenidos algo mayores de arcilla, lo cual hace que la textura presente sea una textura franco arcillo-arenosa. También resulta un rasgo importante del suelo su densidad aparente, ya que permitirá a posteriori transformar los volúmenes de suelo perdido en masa. En este caso oscila entre 1410 kg m^{-3} para Ay-1 y 1450 kg m^{-3} en el caso de Ay-2.

El cultivo desarrollado en los dos campos agrícolas estudiados es herbáceo, cereal, sembrado entre octubre y noviembre en función de las precipitaciones estacionales previa preparación del suelo con cultivador.

Tabla 5.3: Descripción morfológica del perfil del suelo de Arroyomolinos y de los distintos horizontes.

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL	Clasificación del suelo	FAO, 1989: <i>Luvisol cutánico (LVct)</i>
	Localización	Termino municipal de Arroyomolinos. Finca "Ay-1"
	Coordenadas	40° 18' 12.56" N, 3° 54' 35.24" W
	Altitud	653 m
	Posición fisiográfica	En pendiente cóncava, en vaguada
	Topografía del terreno circundante	Ondulado
	Pendiente	Muy suave, 0-2%
	Exposición	Sur
	Material originario	Arcosas procedentes de la erosión de granitos y rocas metamórficas de la Sierra de Guadarrama
	Drenaje	Clase 3. Moderadamente bien drenado
	Condiciones de humedad	Húmedo por debajo de los 30-40 cm
	Profundidad de la capa freática	Superior a 2 m
	Pedregosidad superficial	Clase 1. Muy pocas, < 7.5 cm
	Afloramientos rocosos	No
	Evidencia de erosión	Si
	Influencia humana	Si, suelo agrícola
	Uso del suelo	Cultivo de cereal. Se encontraba aun poco desarrollado

DESCRIPCIÓN DE LOS HORIZONTES	Breve descripción del perfil	El perfil del suelo presenta un total de 4 horizontes: Ap, 2A, 2Bt y C, hasta unos 70-75 cm de profundidad. Seco en superficie va ganando en humedad según se desciende. En la parte superior presenta muchas raíces que van disminuyendo con la profundidad. También presenta cutanes en profundidad.
	Horizonte Ap	Hasta una profundidad de 20 cm. El límite inferior es neto plano. Color: 10YR 5/3 en húmedo; 10YR 6/3 en seco. La estructura es de granos sueltos, muy débil con bloques subangulares medios y de consistencia muy friable. Presenta una porosidad elevada, de poros gruesos. La presencia de raíces es frecuente pero estas son muy finas.
	Horizonte 2A	Hasta una profundidad de 40 cm. El límite inferior es neto plano. Color: 10YR 5/4 en húmedo. La estructura es de grano simple, muy débil con bloques subangulares, de consistencia muy friable. La porosidad es elevada, con poros gruesos, mientras las raíces son frecuentes pero muy finas.
	Horizonte 2Bt	Hasta una profundidad de 60 cm. El límite inferior es neto plano. Color: 10YR 4/3 en húmedo. La estructura es poliédrica subangular, gruesa, débil, de consistencia firme y con presencia de cutanes. La porosidad se mantiene elevada, de poros gruesos, mientras que la presencia de raíces desaparece en este horizonte.
	Horizonte C	A partir de los 60 cm. Color: 7.5YR 4.5/6 en húmedo; 7.5YR 4.5/6 en seco. En el caso de los cutanes, el color es: 7.5YR 3.5 en húmedo; 7.5YR 3.5/4 en seco. Presenta dos estructuras, una primera prismática gruesa fuerte; una segunda poliédrica angular gruesa fuerte. La consistencia es extremadamente dura en seco, siendo los cutanes gruesos, continuos en paredes de agregados. La porosidad es fina a muy fina, no habiendo presencia de raíces.

5.2.1.1.3. Caracterización de las laderas de estudio

En los dos campos estudiados en Arroyomolinos, Ay-1 y Ay-2, se han individualizado una serie de microcuencas hídricas, vinculadas a aquellas superficies donde se desarrollaron redes de regueros. A estas áreas se ha sumado una microcuenca sin rasgos de erosión por regueros pero con características topográficas similares a aquellas donde si existían rasgos erosivos dentro de Ay-1.

En Ay-1 se individualizaron hasta cuatro microcuencas: tres con presencia de redes de regueros y una cuarta sin presencia de erosión por flujos concentrados. Es importante resaltar la presencia de dos morfologías diferentes de redes de regueros en las microcuencas estudiadas: mientras en Ay1-1 se desarrolló una red de regueros dendríticos; en Ay1-2 y Ay1-3 se desarrollaron regueros confinados en los surcos de labor previos, debido a que la dirección del laboreo fue a favor de la máxima pendiente.

En Ay-2 se individualizaron hasta un total de once microcuencas con desarrollo de redes de regueros dendríticos.

En las figuras 5.3 y 5.4 pueden verse los mapas topográficos del área de estudio con las divisorias de las microcuencas consideradas. En la figura 5.3, Ay1-2 y Ay1-3 aparecen en rojo porque son superficies seleccionadas como representativas de la totalidad de la superficie afectada por regueros confinados, en azul, cuya erosión no fue cartografiada en su totalidad. Fuera de estas superficies (Ay-1 y Ay1-2 y Ay1-3) no se identificaron rasgos de erosión por regueros y/o cárcavas efímeras. Sin embargo, si fue cartografiada la superficie Ay1-4 para su posterior estudio, ya que, sin presentar rasgos erosivos, sus características topográficas no distaban mucho de la ladera opuesta, Ay1-2 y Ay1-3, que si sufrió erosión por flujos concentrados.

Para elaborar estos modelos digitales del terreno (figuras 5.3 y 5.4) se registraron las coordenadas relativas de más de 2000 puntos (1182 en el caso de Ay-1 y 942 para Ay-2) utilizando una estación total.

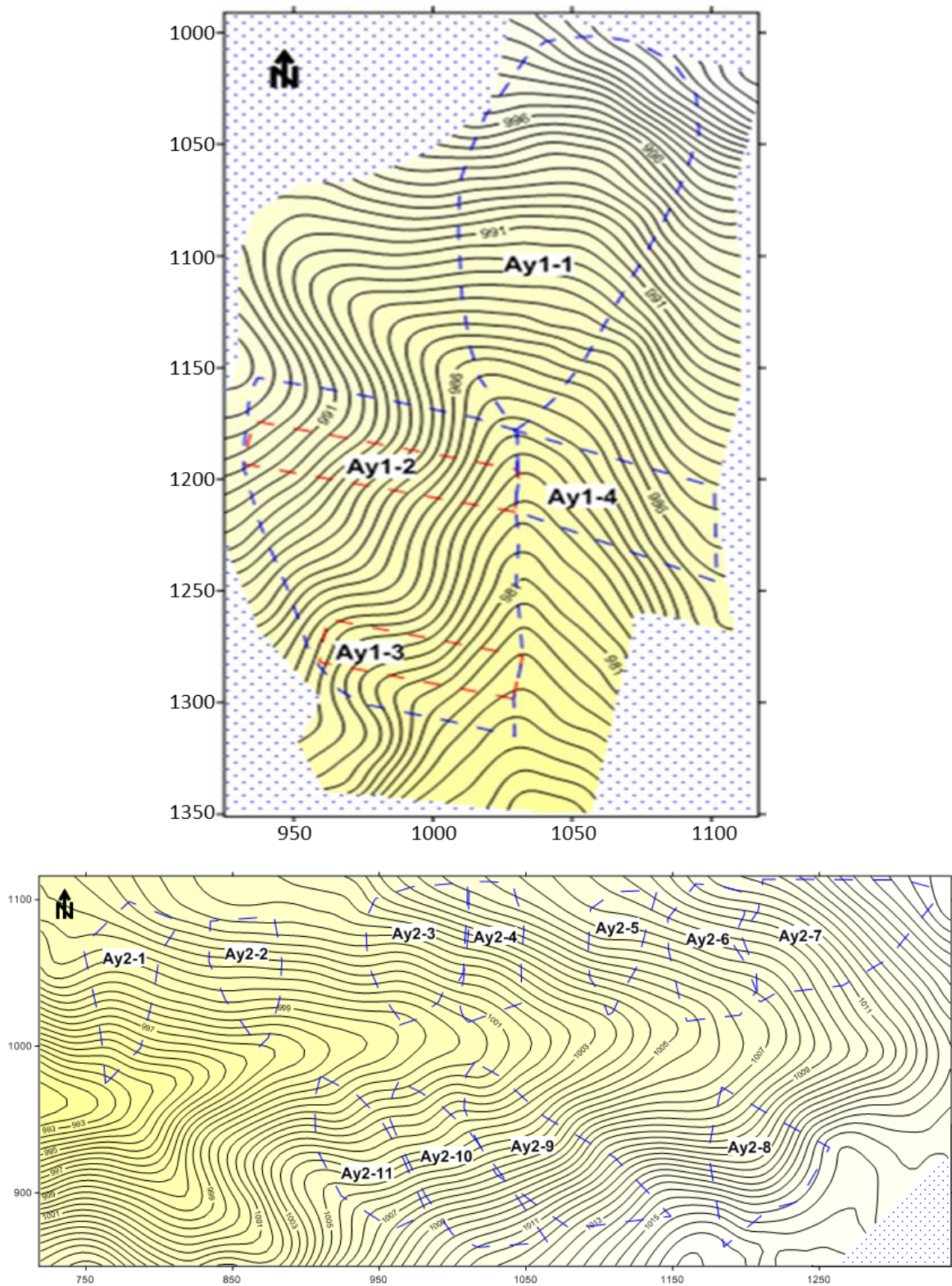


Figura 5.3 (arriba): Mapa topográfico de Ay-1 donde puede observarse la posición de las distintas microcuencas (en línea discontinua azul). Las líneas discontinuas rojas indican las dos superficies de referencia que se han caracterizado dentro del área afectada por los regueros. La equidistancia entre curvas de nivel es de 0.5 m. La escala se presenta en metros.

Figura 5.4 (abajo): Mapa topográfico de Ay-2 donde puede observarse la posición de las distintas microcuencas con desarrollo de redes de regueros (en línea discontinua azul). La equidistancia entre curvas de nivel es de 0.5 m. La escala se presenta en metros.

5.2.1.2. Caracterización de la precipitación desencadenante de la erosión del suelo

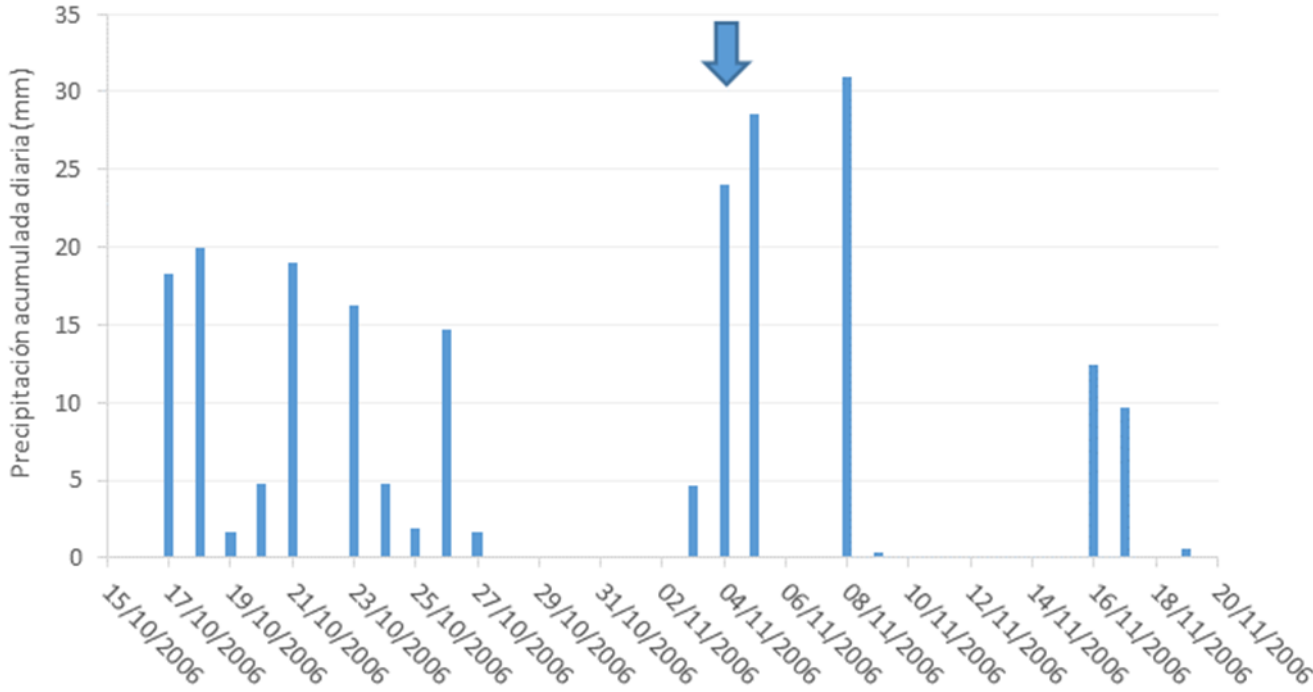
Los datos de precipitación fueron obtenidos de la estación meteorológica de Cuatro Vientos (Madrid) situada a unos 12 kilómetros de la zona de estudio. La precipitación desencadenante de la erosión fue la de los días 3 y 4 de noviembre de 2006, días en los que se llegaron a acumular 52.6 mm en 48 horas, 24 y 28.6 mm respectivamente. Cabe destacar que en los días anteriores se habían producido precipitaciones de poca intensidad, que en ningún caso desencadenaron la erosión, pero que debieron mantener el suelo en condiciones húmedas próximas a la saturación (figura 5.5).

En la zona de estudio, para la serie de 38 años (1977-2015), la precipitación media anual es de 423.5 mm. Considerando dicho valor de precipitación anual media, la precipitación desencadenante de la erosión estudiada, 52.6 mm, supone en torno al 12% de la precipitación anual media. El año meteorológico 2006-2007 fue más húmedo que la media de la serie de 38 años, presentando una precipitación anual de 531.4 mm. La aplicación de la distribución de Gumbel para la precipitación máxima acumulada en 48 horas mensual aplicando el modelo CHAC (Cálculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas) elaborado por el CEDEX para la serie temporal 1945-2011 ha ofrecido un valor para el periodo de retorno de 3.8 años (figura 5.6).

Considerando los valores de la precipitación desencadenante de la erosión en Arroyomolinos y el periodo de retorno calculado, la precipitación de los días 3 y 4 de noviembre de 2006 no es un evento extraordinario de precipitación. Se trata de un temporal de invierno donde sobre condiciones húmedas de suelo, debido a las lluvias en los días antecedentes, se desencadena un evento de precipitación de intensidad moderada. En estas circunstancias, el suelo se satura de agua y su capacidad de infiltración se reduce, ante lo que buena parte de la precipitación se convierte en escorrentía superficial, dando lugar, en determinadas circunstancias, a procesos de concentración de la escorrentía y a la incisión de regueros y/o cárcavas efímeras.

Página siguiente: Figura 5.5: Pluviograma de precipitación acumulada en 24 horas para el periodo de estudio (octubre-noviembre 2006) en Cuatro Vientos. La erosión se desencadenó durante la lluvia de los días 3 y 4 de noviembre (FLECHA). La precipitación del día 7 de noviembre, pese a ser superior en volumen (31 mm), no modificó en gran medida los regueros anteriormente desarrollados, por lo que no ha sido considerada a la hora de determinar el periodo de retorno de la precipitación

Pluviograma (Cuatro Vientos)



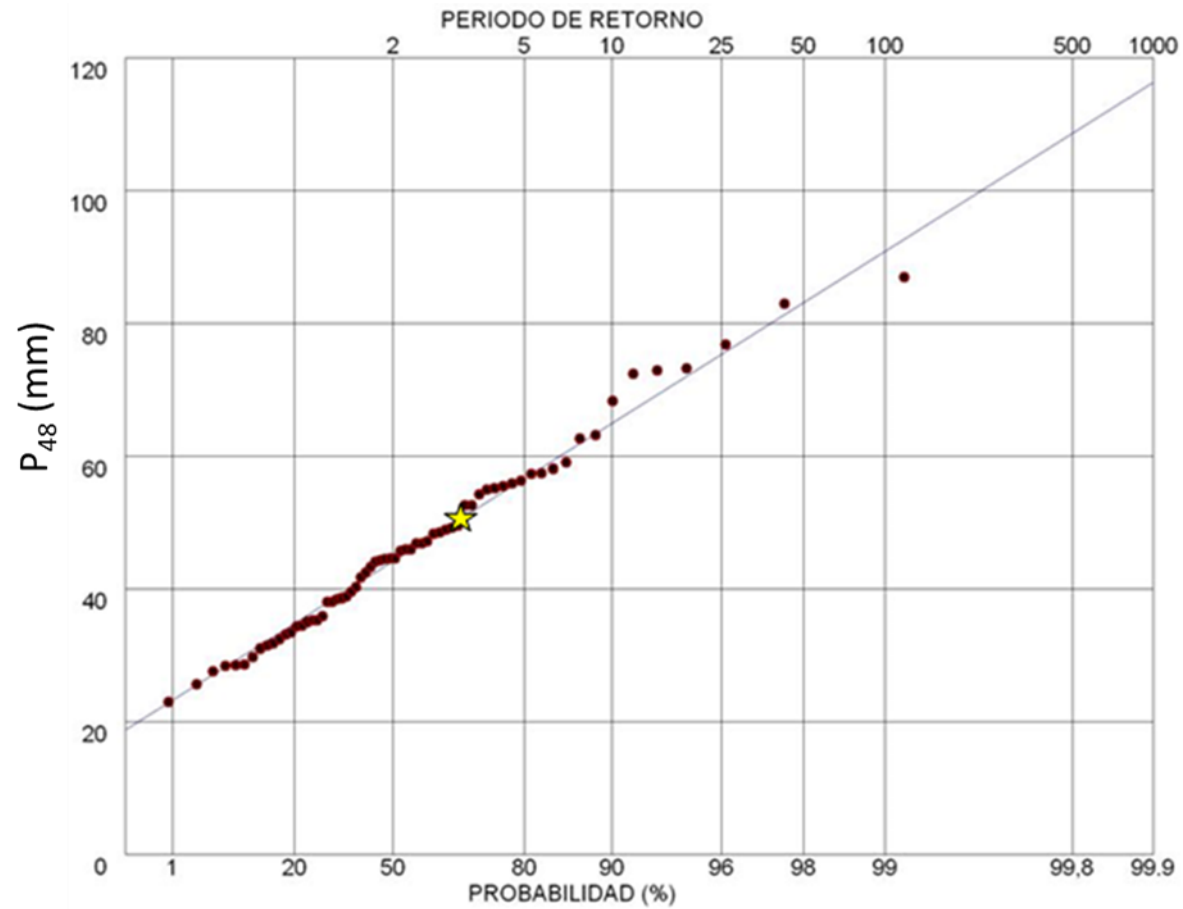


Figura 5.6: Distribución de Gumbel para P_{48} (serie temporal 1945-2011 de la estación de Cuatro Vientos). En el eje superior se indican los periodos de retorno para episodios con precipitaciones acumuladas en 48 h (P_{48}) y en el eje inferior la probabilidad de que en un año dado no se produzca una precipitación superior a P_{48} . La estrella amarilla indica el valor del periodo de retorno correspondiente a la precipitación desencadenada en Arroyomolinos.

5.2.1.3. Resultados

5.2.1.3.1. Arroyomolinos campo 1 (Ay-1)

En Ay-1 se distinguieron tres zonas de interés (figura 5.3) fácilmente diferenciables a simple vista sobre el campo (foto 5.1) y que fueron motivo de estudio individualizado:



Foto 5.1: Aspecto general de Ay-1.

Sobre la fotografía destacan las enormes dimensiones del canal de fondo de vaguada. En la cabecera del campo de cultivo (parte derecha de la fotografía) puede verse la red de regueros dendríticos que desaguan en el canal de fondo de vaguada. A la derecha de dicho canal se desarrollaron regueros confinados, en tonos marrones. En la ladera opuesta, parte izquierda de la fotografía, no se produjo desarrollo de incisiones.

1) Microcuenca Ay1-1

Se trata de una superficie, situada en la cabecera de la ladera agrícola, sobre la que se desarrolló una red de regueros dendríticos (foto 5.2). En esta superficie la dirección del laboreo se aproximó a la de las curvas de nivel.



Foto 5.2: Aspecto de Ay1-1.

Sobre la fotografía puede apreciarse la red de regueros dendríticos de importantes dimensiones.

2) Microcuencas Ay1-2 y Ay1-3

Sobre una gran superficie con desarrollo de regueros confinados fueron individualizadas, por razones logísticas, dos ventanas de control representativas: Ay1-2 y Ay1-3. Sobre esta superficie la dirección del laboreo fue a favor de la máxima pendiente.

En este caso cada uno de los surcos de labor funciona a modo de microcuenca debido a la existencia de caballones entre cada surco, topográficamente más elevados, que funcionan a modo de divisoria de aguas y limitan la conectividad entre los regueros, impidiendo los aportes laterales de agua entre regueros. Por lo tanto las ventanas de control no se

corresponden estrictamente con microcuencas hidrológicas sino que abarcan un buen número de ellas dentro de sus límites (foto 5.3).



*Foto 5.3: Al fondo, regueros confinados, paralelos entre sí.
En primer término, los regueros dendríticos.*

3) Microcuenca Ay1-4

Superficie sin desarrollo de formas de incisión que se ha considerado como representativa de la superficie total sin desarrollo de formas erosivas. En este caso la dirección de la labor se desarrolló a favor de la máxima pendiente, por lo que potencialmente esta superficie podría haber desarrollado morfologías confinadas de regueros.

Junto a las laderas afectadas por las morfologías erosivas, también debe considerarse, a la hora de determinar la erosión total del campo de cultivo, el canal de fondo de vaguada. Si bien esta cárcava efímera es el canal de desagüe de todo el campo de cultivo y se desarrolla, por la propia morfología cóncava del campo, en la posición topográficamente más baja.

Topográficamente, el campo de cultivo, que presenta forma de cuenca cóncava con cierre en forma semicircular, abarca un total de 9.22 ha con una pendiente media del 9.13%. Las superficies con presencia de regueros dendríticos y con presencia de regueros confinados resultan similares, 1.33y 1.32 ha, respectivamente; mientras que la pendiente media del área con desarrollo de regueros dendríticos es ligeramente mayor, 9.12% frente a 8.48%. En el caso de la microcuenca Ay1-4, el valor de la pendiente media resultó inferior, apenas del 6.63%. Por lo tanto existe un primer factor ligeramente diferenciador que ha podido limitar el desarrollo de la erosión en esta zona. En la tabla 5.4 pueden observarse algunos valores topográficos relevantes para la caracterización de las superficies de estudio.

Cuando se presenta el dato de aparición del primer reguero se hace referencia a la distancia existente entre la divisoria superior de aguas, aquella topográficamente a cota mayor, y el desarrollo del primer reguero en la microcuenca, considerando como referente de medición el perfil longitudinal de la microcuenca. Con este valor se quiere hacer referencia al cinturón marginal de no erosión definido por Horton (1945).

En el caso de los valores asignados a la totalidad de la superficie con desarrollo de regueros confinados (confinados total) se trata de los valores medios entre las dos ventanas de control cartografiadas.

Tabla 5.4: Características topográficas de las superficies de estudio.

	Área (m ²)	Pendiente media (%)	Pendiente máxima (%)	Longitud de la microcuenca (m)	Desnivel máximo (m)	Aparición primer reguero (m)
Ay-1 (total)	50946.92	9.13	15.6	ϕ	27.77	ϕ
Ay1-1	13345.02	9.12	15.6	181.59	16.57	12.68
Ay1-2	1983.89	9.43	13.6	99.95	9.43	19.59
Ay1-3	1355.21	6.98	10.17	73.48	5.13	18.65
Confinados total	13273.23	8.48	13.6	87.43	9.43	18.65
Ay1-4	3816	5.63	9.52	71.04	4	ϕ

En cuanto a las características físicas del suelo, ya se ha indicado anteriormente que se trata de un suelo con textura arenosa, con excepciones en una pequeña zona, donde existe una presencia más elevada de arcilla, por encima del 20%, dando texturas franco arcillo-arenosas (tabla 5.1). Cabe destacar que esta zona más arcillosa se corresponde con la ventana de control Ay1-4. Por lo tanto existe un segundo factor ligeramente diferenciador que ha podido limitar el desarrollo de la erosión en esta zona. El campo de cultivo se encontraba, en el momento de la precipitación desencadenante de la erosión, recién sembrado de cereal que apenas había comenzado a crecer. El grado de cobertura vegetal era muy bajo, probablemente inferior al 5%, podría considerarse casi inexistente.

El resultado de la cubicación de la erosión llevada a cabo en estas tres microcuencas aparece en la tabla 5.5. La pérdida total de suelo por el desarrollo de incisiones es de 52.84 m³, lo que supone una tasa de erosión de 55.8 Mg ha⁻¹. La tasa de erosión anual equivalente total, considerando el periodo de retorno que se ha calculado para el evento erosivo (3.8 años) y la erosión laminar estimada, es de 17.95 Mg ha⁻¹ año⁻¹. Cabe recordar que esta cifra representa la erosión mínima asociada al evento de precipitación.

De las características de los regueros en Ay1-1 cabe destacar la aparición del primer reguero a 12.68 m de la divisoria superior de aguas. Considerando que el perfil longitudinal de la microcuenca tiene 181.59 m, el cinturón marginal de no erosión de Horton (1945) ocuparía el 6.98% de dicho perfil. La cartografía de la red de regueros permite visualizar la distribución espacial de la red de regueros a lo largo de la superficie de Ay1-1 (figura 5.7). El valor medio de la sección del canal de los regueros es de 0.1080 m². La RAP (Relación Anchura-Profundidad) calculada es de 4.41, con una densidad de drenaje de 0.057 m m⁻² (tabla 5.5).

Por último, la rugosidad orientada, dirección seguida por el laboreo a lo largo de Ay1-1, ha sido, aproximadamente, la de las curvas de nivel, (figura 5.7). Al tratarse de la cabecera de la cuenca hidrológica el terreno presenta una concavidad central que hace que el laboreo a nivel *sensu stricto* sea complicado y termine siendo un laboreo oblicuo de alto ángulo con respecto a la dirección de la máxima pendiente.

Tabla 5.5: Resumen de la erosión por regueros en las microcuencas de Ay-1.

Cuenca	Fecha	Evento de lluvia erosivo (mm)	Estado del suelo previo a la erosión. Dirección surcos labor	Cárcava y/o reguero										EL	ET	TEAE*
				L (m)	Número de cabeceras	D.D. (m m ⁻²)	Sección			R.A.P.		Erosión				
							Media (m ²)	c.v.	n	Media	c.v.	V (m ³)	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹ año ⁻¹
Ay1-1	3 y 4 de noviembre de 2006	52.6	Recién sembrado, sin cobertura vegetal. Paralelos a c.n.	767.01	87	0.057	0.1080	4.75	381	4.41	1.32	52.84	55.8	12.40	68.2	17.95
Ay1-2	3 y 4 de noviembre de 2006	52.6	Recién sembrado, sin cobertura vegetal. Perpendiculares a c.n.	782.13	25	0.396	0.0068	0.65	44	2.93	0.48	4.68	33.3	7.40	40.7	10.71
Ay1-3	3 y 4 de noviembre de 2006	52.6	Recién sembrado, sin cobertura vegetal. Paralelos a c.n.	382.2	31	0.282	0.0078	1.10	89	1.90	0.49	1.78	18.5	4.11	22.6	5.95
Ay1-2-3 (total)	3 y 4 de noviembre de 2006	52.6	Recién sembrado, sin cobertura vegetal. Paralelos a c.n.	1164.33	56	0.339	0.0073	0.87	133	2.41	0.48	6.46	27.28	6.06	33.3	8.77

Siendo: L: longitud; D.D.: densidad de drenaje; c.v.: coeficiente de variación; n: número de secciones medidas; R.A.P.: relación anchura-profundidad; V: volumen; c.n.: curvas de nivel; EL: Erosión laminar estimada; ET: erosión total; TEAE: Tasa de erosión anual equivalente (relación entre la tasa de erosión del evento y el periodo de retorno de la precipitación que la ha generado).

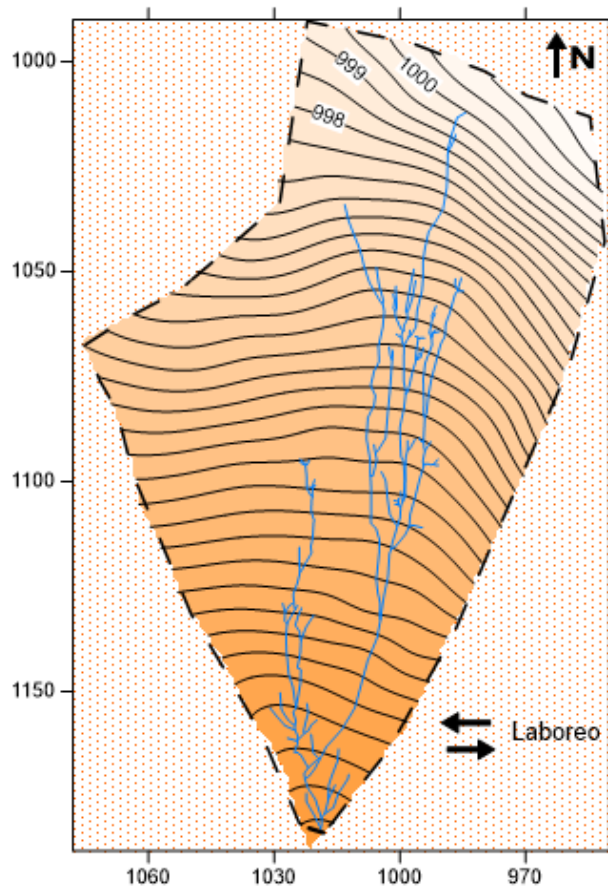


Figura 5.7: Mapa topográfico de Ay1-1 con la posición de la red dendrítica de regueros desarrollada.

La equidistancia entre curvas de nivel es de 0.5 m.

La escala se presenta en metros.

En la figura 5.8 pueden observarse las cartografías de las redes de regueros estudiadas en Ay1-2 y Ay1-3. Dichas cartografías permiten visualizar la distribución espacial de las redes sobre las superficies estudiadas. En el caso de la ventana de control Ay1-3 presentaba a simple vista algunas diferencias con Ay1-2, y es por ello que se consideró su caracterización, para tener una mayor representatividad de la erosión producida en la totalidad de la superficie con desarrollo de regueros confinados.

En Ay1-2, la primera incisión apareció a una distancia de 19.69 m de la divisoria superior de aguas. Considerando que el perfil longitudinal de la microcuenca tiene 99.95 m, el cinturón marginal de no erosión de Horton (1945) ocuparía el 19.7% de dicho perfil. En el caso de la ventana de control Ay1-3, la longitud del perfil longitudinal de la microcuenca fue de 73.48 m, apareciendo la primera incisión a una distancia de 18.65 m de la divisoria superior de aguas. Por lo tanto, en este caso el cinturón marginal de no erosión de Horton (1945) abarca el 25.38% de la longitud total del perfil longitudinal de la microcuenca.

El valor medio de la sección de los canales fue de 0.0068 m^2 para Ay1-2 y de 0.0078 m^2 para Ay1-3. En Ay1-2 la RAP media alcanzó 2.93, mientras el valor de Ay1-3 fue algo inferior, 1.90.

En cuanto a las densidades de drenaje se situaron en 0.144 y 0.286 m m^{-2} para Ay1-2 y Ay1-3, respectivamente (tabla 5.5).

La pérdida total de suelo por el desarrollo de incisiones en el caso de Ay1-2 fue de 4.68 m^3 , lo que supuso una tasa de erosión de suelo por flujos concentrados de 33.3 Mg ha^{-1} . La tasa de erosión anual equivalente se situó en este caso en $10.71 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En el caso de Ay1-3, la pérdida total de suelo por el desarrollo de incisiones fue de 1.78 m^3 , lo que supuso una tasa de erosión de 18.5 Mg ha^{-1} . Finalmente, la tasa de erosión anual equivalente correspondió a $5.95 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (tabla 5.5).

Si se extrapolan los resultados de las ventanas de control Ay1-2 y Ay1-3 a toda la superficie con desarrollo de regueros confinados se puede determinar que la pérdida de suelo fue de 24.37 m^3 , lo cual determina una tasa de erosión de 25.9 Mg ha^{-1} , y de $8.77 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ como tasa de erosión anual equivalente para el periodo de retorno de 3.8 años (tabla 5.5).

Por último, la rugosidad orientada, dirección seguida por el laboreo en la ladera donde se sitúan Ay1-2 y Ay1-3, ha seguido, aproximadamente, la dirección de la máxima pendiente, (figura 5.8). En realidad, todo el campo de cultivo está labrado en la misma dirección, pero al tener una morfología cóncava con cierre en forma semicircular hace que, en la cabecera del campo el laboreo haya sido aproximadamente perpendicular a la máxima pendiente, mientras en las laderas laterales haya tendido a ser paralelo a la máxima pendiente.

En el caso de Arroyomolinos 1, donde se desarrollan morfologías confinadas la aparición de los primeros regueros se aleja de la divisoria superior de aguas. Concretamente, casi el 20% del perfil longitudinal está libre de la aparición de flujos concentrados, frente a casi el 7% en el caso de Ay1-1. Esto se debe a que la ausencia de aporte lateral de aguas hace que la incisión se distancie más de la divisoria superior de aguas, de la misma manera que, posteriormente, la sección del cauce no aumente en la misma proporción aguas abajo, que en el caso de Ay1-1, morfología dendrítica. Por la misma circunstancia, la RAP calculada es también inferior, concretamente de 2.93. Sin embargo, la densidad de drenaje es superior, 0.144 m m^{-2} , debido a que potencialmente la totalidad de los surcos de labor puede actuar a modo de canal de drenaje, sobre-excavándose. En una visión global de la situación esta mayor densidad de drenaje no compensa un volumen menor de cada uno de los canales, produciéndose en el caso de los regueros confinados unas tasas de erosión sensiblemente inferiores a los de la red dendrítica de Ay1-1.

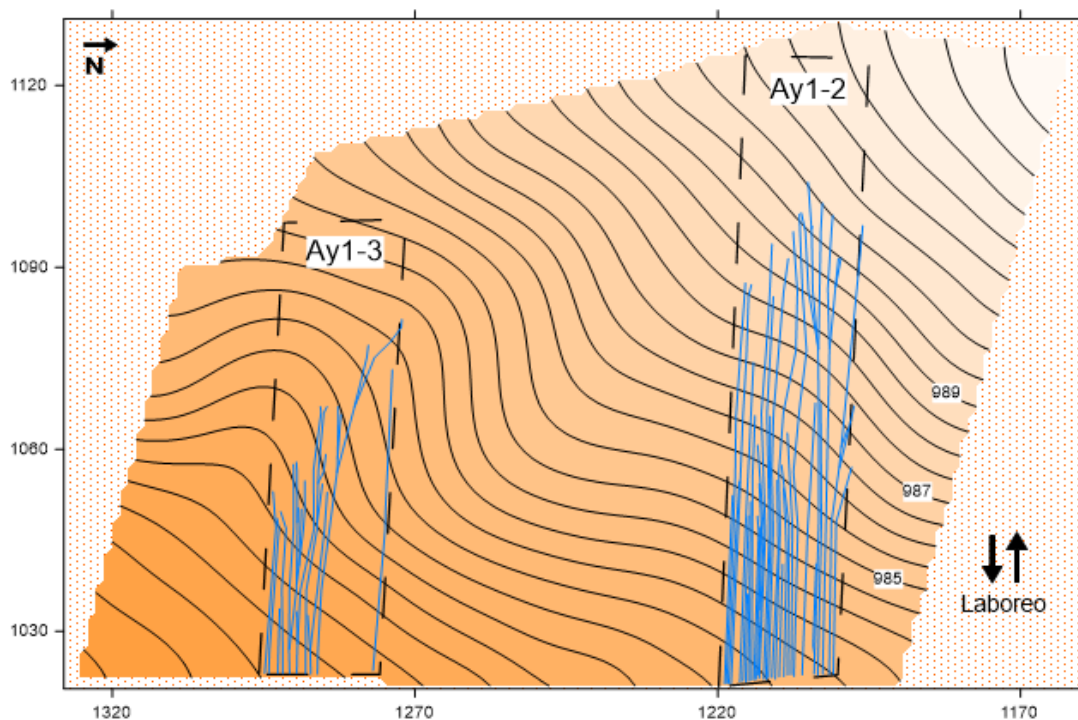


Figura 5.8: Mapa topográfico de la microcuenca con regueros confinados en el que pueden apreciarse las ventanas de control de regueros cartografiadas: Ay1-2 y Ay1-3 con los regueros desarrollados en cada una de ellas. La equidistancia entre curvas de nivel es de 0.5 m. La escala se presenta en metros.

En el caso de Ay1-4, microcuenca sin presencia de regueros que se ubica en la ladera opuesta de Ay1-2 y Ay1-3 dentro del campo de cultivo, donde la dirección de los surcos de labor se

orientaba a favor de la máxima pendiente, potencialmente podría haber desarrollado regueros confinados. Sin embargo, la no presencia de flujos concentrados puede explicarse por la diferencia en la textura del suelo, algo más arcillosa, lo cual supone un sustrato más cohesionado y que requiere una energía superior para la formación de cabeceras de regueros. Esta falta de energía en la escorrentía superficial puede ser explicada por el de una pendiente media algo inferior a los casos de Ay1-2 y Ay1-3, aquellos que pueden compararse inicialmente por presentar la misma rugosidad orientada, pese a que la longitud total de la microcuenca era similar al caso de Ay1-3.

Finalmente, el volumen desalojado en el canal de fondo de vaguada de Ay-1 fue de 112.13 m³ (foto 5.4).



Foto 5.4: Cárcava efímera desarrollada en el fondo de la vaguada de Ay-1.

Sumando este valor a los anteriormente calculados se puede determinar el volumen total de pérdida de suelo en Ay-1 (tabla 5.6), que alcanzó los 208.06 m³. Por lo tanto, considerando la superficie total de Ay-1, la tasa de erosión fue de 57.58 Mg ha⁻¹. En este caso, la tasa de erosión anual equivalente para un periodo de retorno de 3.8 años fue de 15.15 Mg ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 5.6: Resumen de los valores de pérdida de suelo para cada una de las áreas individualizadas y cálculo para la totalidad de Ay-1.

	Volumen perdido (m ³)	Area (m ²)	Tasa de erosión (Mg ha ⁻¹)	Tasa de erosión anual equivalente (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
Sup. regueros dendríticos	64.56	13345.02	68.2	17.95
Sup. regueros confinados	31.37	13273.23	33.3	8.77
Canal fondo de vaguada	112.13	-	-	-
Erosión total Ay-1	208.06	50946.92	57.58	15.15

5.2.1.3.2. *Arroyomolinos campo 2 (Ay-2)*

El campo de cultivo Ay-2 presenta forma de cuenca hídrica cóncava con cierre semicircular hacia el Este (figura 5.4). La morfología cóncava del campo de cultivo dio lugar, a partir de la precipitación desencadenante del evento erosivo, al desarrollo de una cárcava efímera en el fondo de la vaguada de considerables dimensiones, al igual que en el caso de Ay-1. Hasta esta importante línea de drenaje de la totalidad del campo confluyeron un total de 11 redes de regueros dendríticas (foto 5.5), que en la mayoría de los casos tuvieron escaso desarrollo, cuando no, un único canal. Todas ellas se desarrollaron en las laderas laterales de Ay-2 que presentaban una cierta ondulación dibujando pequeñas microcuencas, en algunos casos con morfología cóncava pronunciada, que facilitaron el desarrollo de los regueros a favor de pequeños fondos de vaguada (figura 5.4). En la cabecera de Ay-2 no se desarrolló ninguna red de regueros, como si sucedió en Ay-1.



Foto 5.5: Vista parcial de Ay-2 donde se aprecian las redes de regueros de morfologías dendríticas.

El campo de cultivo Ay-2 abarca un total de 15.87 ha con una pendiente media de 3.62%. En la tabla 5.7 pueden observarse algunos valores topográficos relevantes para la caracterización de las superficies con desarrollo de rasgos erosivos.

Tabla 5.7: Características topográficas de las superficies de estudio.

	Área (m2)	Pdte media (%)	Pdte máxima (%)	Longitud microcuenca (m)	Desnivel máximo (m)	Aparición primer reguero (m)
Ay-2 (total)	119538.33	3.62	10.01	φ	32.84	φ
Ay2-1	3850.13	7.86	16.4	122.96	9.66	46.9
Ay2-2	2776.81	7.54	13.5	87.45	6.60	49.1
Ay2-3	4505.85	7.76	10.25	103.47	8.03	53.25
Ay2-4	3122.03	8.29	9.5	88.52	7.34	30.52
Ay2-5	2056.96	8.46	9.3	75.87	6.42	37.77
Ay2-6	4224.05	6.83	14.91	95.57	6.53	16.54
Ay2-7	7634.11	7.23	8.24	135.72	9.81	77.89
Ay2-8	5108.65	7.93	16.9	74.79	7.34	3.49
Ay2-9	6927.25	7.40	10.32	189.63	14.04	167.61
Ay2-10	5559.38	7.95	10.89	144.95	11.52	103.16
Ay2-11	3908.01	8.05	11.02	116.10	9.35	90.30

El evento erosivo, desarrollo de las redes de regueros, al igual que en el caso de Ay-1, se produjo con un cultivo apenas incipiente, cuyo grado de cobertura vegetal era muy bajo, probablemente inferior al 5%, por lo que se puede considerar que el suelo estaba desnudo.

El resultado de la cubicación del suelo perdido en cada una de las microcuencas de Ay-2 puede verse en la tabla 5.8.

Tabla 5.8: Resumen de la erosión por regueros en las microcuencas de Ay-2.

cuenca	Fecha	Evento de lluvia erosivo (mm)	Estado del suelo previo a la erosión. Dirección surcos labor	Cárcava y/o reguero										EL	ET	TEAE
				L (m)	Número de cabeceras	D.D. (m m ⁻²)	Sección			R.A.P.		Erosión				
							Media (m ²)	c.v.	n	Media	c.v.	V (m ³)	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹ año ⁻¹
Ay2-1	3 y 4 de nov. de 2006	52.6	Sin cobertura vegetal. Paralelos a c.n.	89.00	4	0.023	0.0322	0.59	23	2.75	0.52	3.48	13.11	2.91	16.0	4.22
Ay2-2	3 y 4 de nov. de 2006	52.6	Sin cobertura vegetal. Paralelos a c.n.	83.40	5	0.030	0.0165	1.07	25	3.02	0.46	1.40	7.31	1.62	8.9	2.35
Ay2-3	3 y 4 de nov. de 2006	52.6	Sin cobertura vegetal. Paralelos a c.n.	240.42	26	0.053	0.0210	0.75	172	3.15	0.43	5.14	16.54	3.68	20.2	5.32
Ay2-4	3 y 4 de nov. de 2006	52.6	Sin cobertura vegetal. Paralelos a c.n.	143.59	15	0.046	0.0207	1.12	119	3.38	1.14	3.05	14.17	3.15	17.3	4.56
Ay2-5	3 y 4 de nov. de 2006	52.6	Sin cobertura vegetal. Paralelos a c.n.	56.37	3	0.027	0.0218	1.19	15	3.39	0.51	1.61	11.35	2.52	13.9	3.65
Ay2-6	3 y 4 de nov. de 2006	52.6	Sin cobertura vegetal. Paralelos a c.n.	104.39	10	0.025	0.0197	0.71	49	5.11	0.59	2.44	8.38	1.86	10.2	2.70
Ay2-7	3 y 4 de nov. de 2006	52.6	Sin cobertura vegetal. Paralelos a c.n.	235.29	14	0.031	0.0292	1.02	64	4.22	0.62	5.86	11.13	2.47	13.6	3.58
Ay2-8	3 y 4 de nov. de 2006	52.6	Sin cobertura vegetal. Paralelos a c.n.	160.13	16	0.031	0.0313	0.10	69	3.88	0.67	5.64	16.01	3.56	19.6	5.15
Ay2-9	3 y 4 de nov. de 2006	52.6	Sin cobertura vegetal. Paralelos a c.n.	46.26	6	0.007	0.0525	0.90	25	6.89	0.84	1.56	3.27	0.73	4.0	1.05
Ay2-10	3 y 4 de nov. de 2006	52.6	Sin cobertura vegetal. Paralelos a c.n.	59.28	6	0.011	0.0357	0.99	30	3.85	0.62	2.22	5.79	1.29	7.1	1.86
Ay2-11	3 y 4 de nov. de 2006	52.6	Sin cobertura vegetal. Paralelos a c.n.	36.60	5	0.009	0.0210	0.91	18	3.22	0.38	0.83	3.08	0.68	3.8	0.99

Siendo: L: longitud; D.D.: densidad de drenaje; c.v.: coeficiente de variación; n: número de secciones medidas; R.A.P.: relación anchura-profundidad; V: volumen; c.n.: curvas de nivel; EL: Erosión laminar estimada; ET: erosión total; TEAE: Tasa de erosión anual equivalente (relación entre la tasa de erosión del evento y el periodo de retorno de la precipitación que la ha generado).

De las once redes de regueros dendríticas que se han desarrollado en Ay-2, nueve redes presentan como característica común un escaso desarrollo, siendo excepción a estos casos Ay2-3 y Ay2-7. La morfología más común de las redes de reguero desarrolladas en Ay-2 es la de un reguero de mayor o menor sección que se desarrolla a favor de pequeñas vaguadas existentes en cada una de las microcuencas estudiadas. Este reguero principal presenta algunos otros regueros tributarios, no superando en la mayoría de los casos la decena de cabeceras. Este esquema se repite con algunas modificaciones en la práctica totalidad de los casos, excepciones hechas de Ay2-3 y Ay2-7, que presentan un desarrollo algo mayor. El caso de Ay2-3 es un ejemplo *quasi* perfecto de un desarrollo de la red con morfología dendrítica, con multitud de cabeceras, hasta 26, que terminan confluyendo a un canal central único. Por otro lado, el caso de Ay2-7 es un ejemplo de red de regueros mixta entre las morfologías dendrítica y confinada. En este caso los regueros inciden en el interior de los surcos previos de la labor, para posteriormente, romper los caballones que los separan e ir confluyendo ladera abajo a favor de la máxima pendiente para concluir en un reguero único.

En el campo de cultivo se realizó una labranza de dirección constante, aproximadamente Este-Oeste. El hecho de mantener la dirección de la labranza constante en todo el campo es muy común por una cuestión de facilitar los pases de laboreo por parte del agricultor. Este hecho provoca con asiduidad que la rugosidad orientada, determinada por los surcos de labranza, dibuje diferentes ángulos respecto a la máxima pendiente en función de la morfología del campo de cultivo. En este caso, en las laderas laterales del campo la dirección de la labranza fue aproximadamente perpendicular a la máxima pendiente, mientras que dicha dirección fue a favor de la máxima pendiente en la zona de cabecera, por la propia morfología cóncava del campo de cultivo en esta zona (figura 5.4)

Dentro de las características anteriormente descritas como comunes a estas once redes de regueros, las microcuencas Ay2-2, Ay2-9 (figura 5.9), Ay2-10 y Ay2-11 (figura 5.10), representan los casos con menor desarrollo de regueros. En todos estos casos la red apenas aparece en el último tercio de la microcuenca.

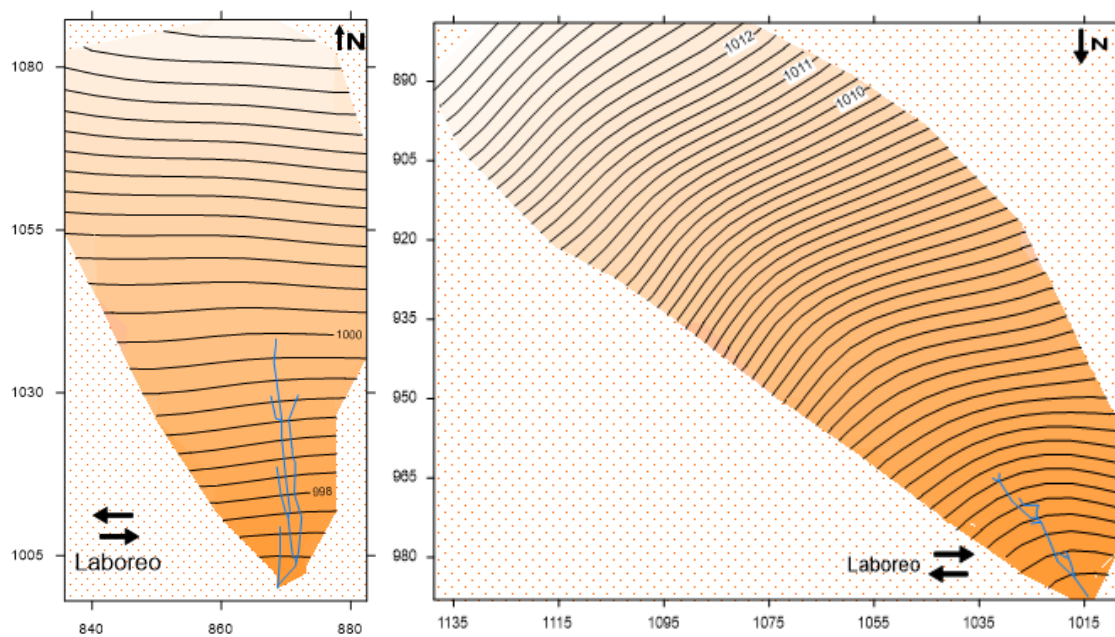


Figura 5.9: Mapa topográfico de Ay2-2 (izqda.) y Ay2-9 (drcha.) con la posición de los regueros cartografiados. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 0.25 m. La escala se presenta en metros.

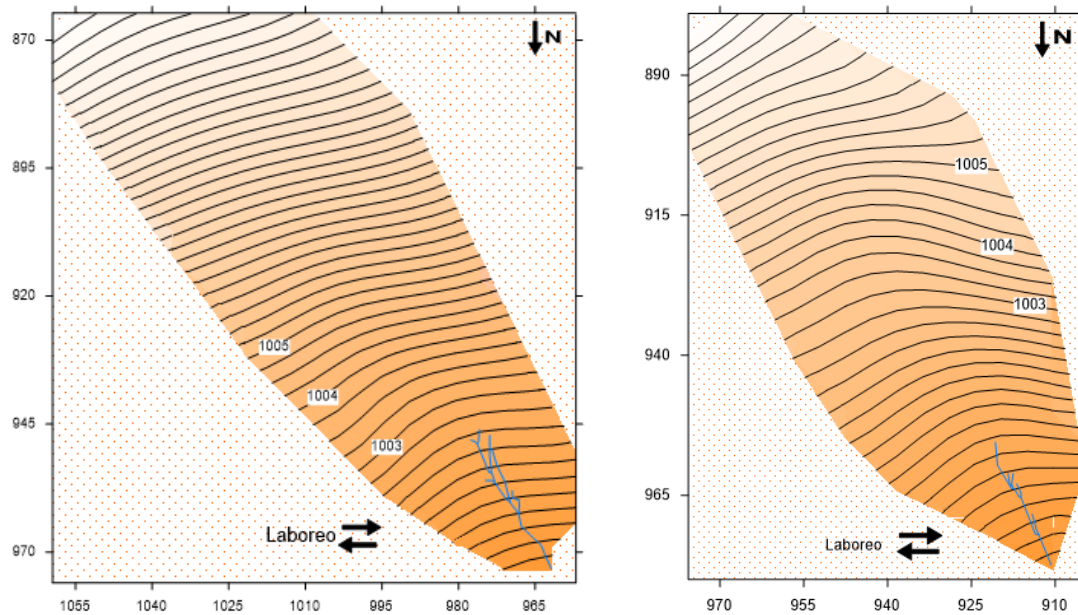


Figura 5.10: Mapa topográfico de Ay2-10 (izqda.) y Ay2-11(drcha.) con la posición de los regueros cartografiados. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 0.25 m. La escala se presenta en metros.

Con algo más de longitud del canal principal están las redes de regueros Ay2-1 y Ay2-5 (figura 5.11). En ambos casos el canal incide a mitad del perfil longitudinal de las microcuencas, aunque apenas reciben aportaciones laterales.

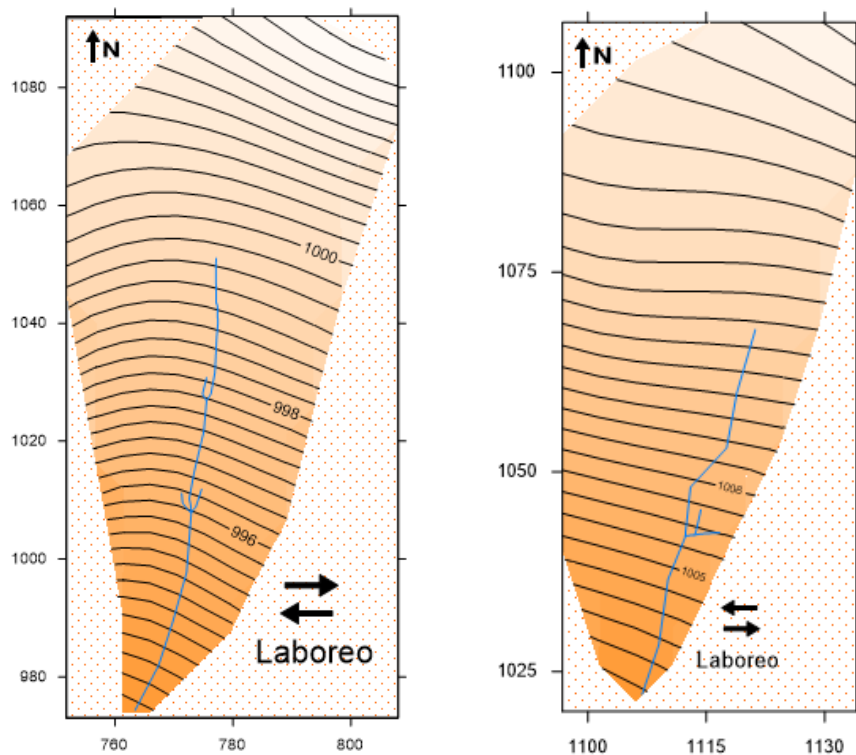


Figura 5.11: Mapa topográfico de las microcuencas Ay2-1 (izquierda) y Ay2-5 (derecha) con la posición de los regueros cartografiados. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 0.25 m. La escala se presenta en metros.

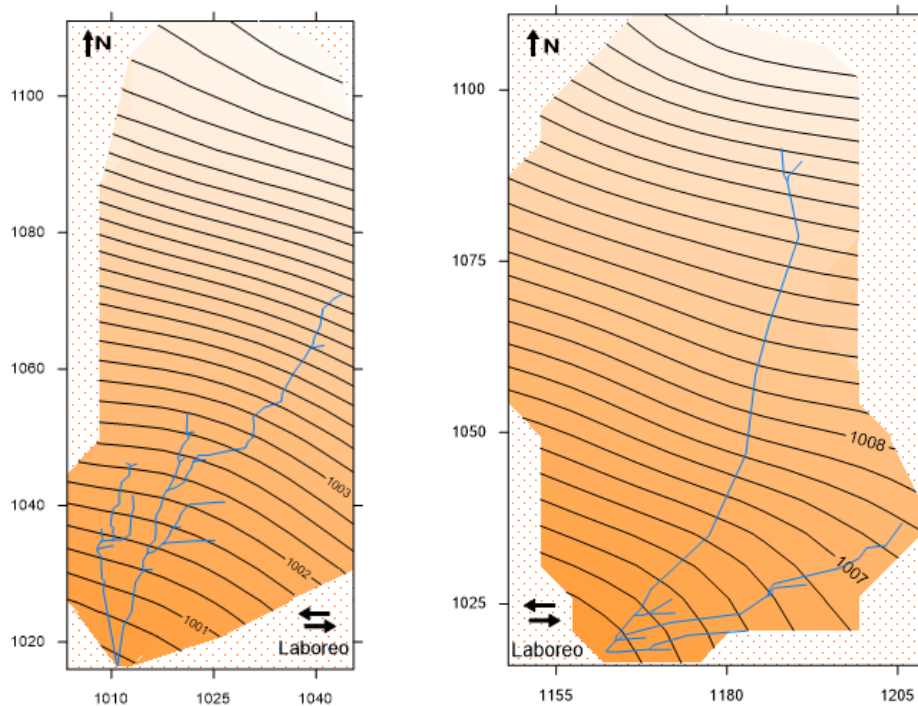


Figura 5.12: Mapa topográfico de las microcuencas Ay2-4 (izquierda) y Ay2-6 (derecha). La equidistancia entre las curvas de nivel es de 0.25 m. La escala se presenta en metros.

Con longitudes totales de la red de regueros superiores a los 100 m se encuentran los casos de Ay2-4 y Ay2-6 (figura 5.12). Ambas coinciden en presentar un canal en el fondo de la vaguada que dibuja la forma cóncava de la microcuenca, junto a un segundo reguero importante que se desarrolla en una zona lateral y que confluye con el principal prácticamente en el punto de desagüe final. Exceptuando estos dos canales principales, el resto son pequeños regueros laterales muy poco desarrollados. Cabe destacar que el inicio del primer reguero en el caso de Ay2-6 se produce a 16.5 m de la divisoria superior de aguas, en el tercio superior de la microcuenca.

Ay2-8 presenta hasta 16 cabeceras e incide a tan solo 3.5 m de la divisoria superior de aguas. Sin embargo, no se trata de una red de regueros compleja y muy desarrollada (figura 5.13). Morfológicamente está compuesta por un canal principal que se ha desarrollado a favor de la concavidad presente y que va recogiendo los aportes laterales de agua, bien de regueros, en su mayoría muy poco desarrollados, bien directamente de la escorrentía superficial.

Como ya se ha citado con anterioridad, son Ay2-3 y Ay2-7, por circunstancias diferentes, las redes más desarrolladas de las 11 caracterizadas, las de mayor longitud total de regueros, pero sin embargo, muy distintas entre ellas.

El caso de Ay2-3 es, morfológicamente, un ejemplo paradigmático de una red dendrítica, con múltiples cabeceras, hasta 26, y múltiples capturas entre regueros de pequeña longitud, que finalizan en un canal único que desagua la microcuenca (figura 5.14).

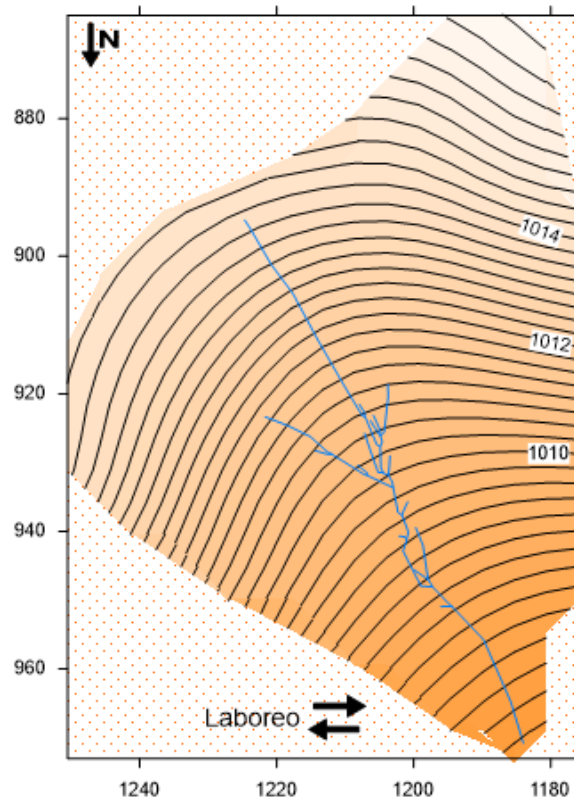


Figura 5.13: Mapa topográfico de la microcuenca Ay2-8 con la posición de los regueros cartografiados. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 0.25 m. La escala se presenta en metros.

En el caso de Ay2-7, no solo la red de regueros desarrollada, sino que la propia morfología de la microcuenca es distinta a las otras diez microcuencas. Al encontrarse cerca de la cabecera del campo de cultivo se ve incluida en el cierre semicircular de la cabecera del campo (figura 5.4). Por ello, las curvas de nivel presentan una curvatura más marcada y ese cambio de dirección de las curvas de nivel hace que la dirección de los surcos de la labor, que se mantiene constante Este-Oeste, en este caso ya no esté próxima a la perpendicular respecto a la máxima pendiente en toda la microcuenca, como si sucede a lo largo de las laderas laterales del campo de cultivo. Mientras en una parte de la microcuenca el ángulo dibujado entre la dirección de los surcos de labor y la máxima pendiente se aproxima a los 90° , en otra, el ángulo es mucho más pequeño, o prácticamente nulo. Este hecho hace que la red de regueros desarrollada en Ay2-7 sea mixta, adoptando una morfología confinada en algunos de los regueros, rectilíneos y paralelos, y dendrítica, especialmente aguas abajo, con multitud de capturas. En la parte superior de la ladera, la máxima pendiente coincide *grosso modo* con la dirección de los surcos de labor, por ello, sobre esta superficie, el agua de escorrentía se canaliza a través de cada uno de los surcos. Si el caudal es suficiente y se supera el esfuerzo cortante crítico, se producirá una incisión en el interior del surco, como así sucede en este caso. En estas condiciones se reproduce un modelo erosivo de regueros confinados, como los casos de Ay1-2 y Ay1-3. Sin embargo, aguas abajo, la concavidad de la microcuenca hace que el agua que fluía en el interior de los surcos tienda a hacerlo a favor de la máxima pendiente, que en esta parte baja de la microcuenca ya no es la dirección de los surcos de labor. De este modo, el agua incide por gravedad contra los caballones, terminando por romperlos y desarrollando, a partir de ese punto, un modelo dendrítico de red de regueros.

Puede observarse en la figura 5.14 (figura derecha) como los primeros regueros incididos mantienen aproximadamente la dirección del laboreo y son paralelos entre sí, para posteriormente ir confluyendo y dibujando una red dendrítica.

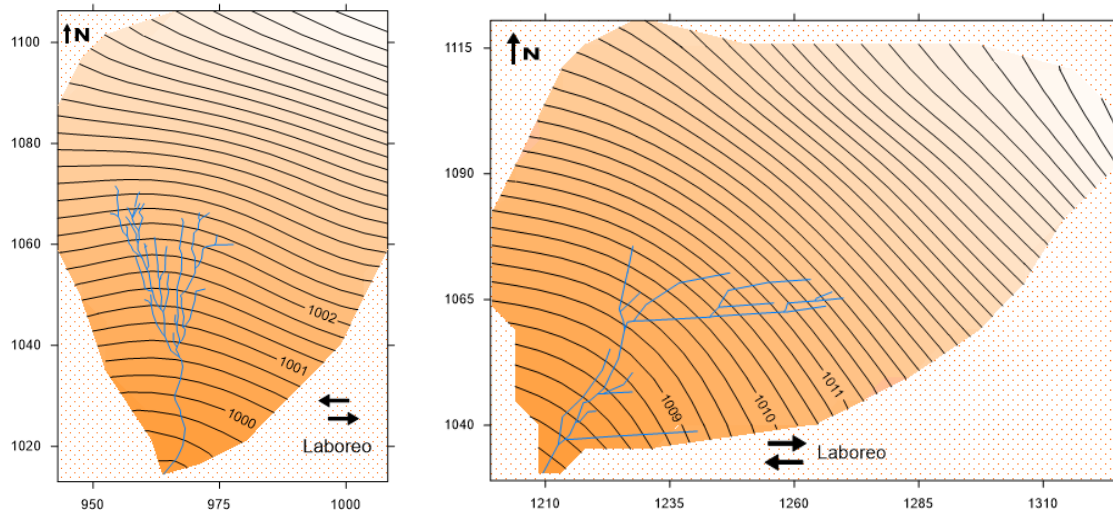


Figura 5.14: Mapa topográfico de las microcuencas Ay2-3 (izquierda) y Ay2-7 (derecha) con la posición de los regueros cartografiados. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 0.25 m. La escala se presenta en metros.

Al igual que en el caso de Ay-1, en Ay-2 también debe considerarse el canal de fondo de vaguada, que ejerce de línea de drenaje mayor para la totalidad del campo de cultivo. Dicho reguero recoge la escorrentía superficial y las aguas drenadas a través de las redes de regueros desarrollados en cada una de las laderas laterales. El volumen de suelo desalojado por este canal fue de 54.03 m^3 (foto 5.6).



Foto 5.6: Cárcava desarrollada en el fondo de la vaguada de Ay-2. Pese a que el cultivo estaba en una fase bastante más avanzada que en el momento de la precipitación, puede observarse perfectamente la dimensión del canal del fondo de vaguada y como se desarrolla en la cota topográficamente más baja, haciendo de línea principal de drenaje de todo el campo de cultivo.

Sumando el volumen de suelo desalojado por el canal de fondo de vaguada a los volúmenes desalojados por cada una de las redes de regueros descritas anteriormente junto a la erosión laminar estimada, se puede calcular el volumen total de pérdida de suelo para Ay-2: 94.65 m^3 . Con este valor se obtiene una tasa de erosión para la totalidad de la cuenca de drenaje de 11.48 Mg ha^{-1} que en términos de tasa de erosión anual equivalente se traduce a $3.02 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (tabla 5.9).

Tabla 5.9: Resumen de los valores de pérdida de suelo para cada una de las microcuencas caracterizadas en Ay-2, junto con el canal de fondo de vaguada y el cálculo para la totalidad del campo.

	Volumen perdido (m ³)	Area (m ²)	Tasa de erosión (Mg ha ⁻¹)	Tasa de erosión anual equivalente (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
Ay2-1	4.25	3850.13	16.0	4.22
Ay2-2	1.71	2776.81	8.9	2.35
Ay2-3	6.28	4505.85	20.2	5.32
Ay2-4	3.73	3122.03	17.3	4.56
Ay2-5	1.97	2056.96	13.9	3.65
Ay2-6	2.98	4224.05	10.2	2.70
Ay2-7	7.16	7634.11	13.6	3.58
Ay2-8	6.89	5108.65	19.6	5.15
Ay2-9	1.91	6927.25	4.0	1.05
Ay2-10	2.71	5559.38	7.1	1.86
Ay2-11	1.01	3908.01	3.8	0.99
Canal fondo de vaguada	54.03	-	-	-
Erosión total Ay-2	94.65	119538.33	11.48	3.02

5.2.2. Episodio erosivo en Villarrubia de los Ojos, Ciudad Real

5.2.2.1. Descripción del área de estudio

5.2.2.1.1. Marco fisiográfico

El municipio de Villarrubia de los Ojos se sitúa al Norte de la provincia de Ciudad Real (Comunidad de Castilla-La Mancha), próxima al límite con la provincia de Toledo y a unos 50 km al Noreste de la capital de la provincia (figura 5.15).



Figura 5.15: Situación de Villarrubia de los Ojos dentro de la provincia de Ciudad Real. Modificado de <https://wikipedia.org>

Se trata de una zona enclavada en la transición entre los Montes de Toledo, al Norte, y la llanura manchega al Sur. Por ello, presenta relieves con fuertes pendientes en su parte Norte que se van suavizando en la transición hacia la llanura.

Con sus algo más de 10000 habitantes, Villarrubia de los Ojos es una localidad eminentemente agraria. De las 28186 ha que constituyen el término municipal, pertenecientes a la Comarca Agraria de La Mancha, hasta un 51.28% son tierras labradas, un total de 14454.44 ha. Dentro de estas, 4428 ha (30.63%) son cultivos herbáceos, mayoritariamente de secano y 10025 ha

(69.36%) corresponden a cultivos leñosos (olivos y vid fundamentalmente), quedando un muy pequeño porcentaje para huertos de consumo familiar. Son de escasa relevancia a escala local las 1205 ha dedicadas a pastos permanentes (4.27%). También se han calificado como otras tierras hasta 3296 ha (un 11.7% del total) (Censo Agrario del Instituto Nacional de Estadística, 2009).

Las tres laderas agrícolas en las que ha sido realizado el estudio, y que en adelante se denominarán como Vo-1, Vo-2 y Vo-3, están situadas en los faldones de la Sierra de la Calderina, al Este de los Montes de Toledo, en la parte más septentrional del término municipal (figura 5.16). La ladera de estudio Vo-1 tiene una superficie total de 740.83 m², la ladera Vo-2 presenta una extensión de 830.4 m², mientras en el caso de Vo-3 dicha superficie llega hasta los 911.78 m².



Figura 5.16: Situación de los tres campos agrícolas de estudio Vo-1 (1), Vo-2 (2) y Vo-3 (3). Como puede verse en la figura, la zona de estudio se sitúa al Norte de la población de Villarrubia de los Ojos, dentro de su término municipal. La ladera 3 se sitúa a 39° 14' 56.48" N de latitud y 3° 36' 45.51" W de longitud Fuente: Visor SIG-PAC. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA).

5.2.2.1.2. Edafología y usos del suelo

Para la caracterización del suelo de los tres campos agrícolas de estudio se describieron dos perfiles edáficos, uno en la ladera Vo-1 y otro en la ladera Vo-2. A esta información se añadió la toma de tres muestras de superficie (primeros 20 cm) en cada una de las tres localizaciones para la obtención de la densidad aparente del suelo. Las tablas 5.10 y 5.11 resumen las principales características físico-químicas de los suelos de estos dos campos agrícolas.

Tabla 5.10: Propiedades físicas de los suelos muestreados en las laderas de Villarrubia de los Ojos. Los datos se refieren al horizonte superficial (20 cm). a: arena (2-0.05 mm); l: limo (0.05-0.002 mm); arc: arcilla (< 0.002 mm). ρ_a : densidad aparente.

Campo	Punto de muestreo	a (%)	l (%)	Arc (%)	Textura (USDA)	ρ_a (gr cm ⁻³)
Vo1-1	A media ladera	73.62	17.76	8.62	Franco arenosa	1.52
Vo1-2	A media ladera	78.15	15.82	6.03	Franco arenosa	1.61
Vo1-3	A media ladera	87.73	7.51	4.76	Arenosa franca	1.38
Vo2-1	A media ladera	75.81	14.11	10.08	Franco arenosa	1.79
Vo3-1	A media ladera	74.35	17.10	8.55	Franco arenosa	1.56
Vo3-2	A media ladera	69.56	19.87	10.56	Franco arenosa	1.48
Vo3-3	A media ladera	60.70	19.40	19.90	Franco arenosa	1.87

Tabla 5.11: Propiedades químicas de los suelos muestreados en las laderas de Villarrubia de los Ojos. Los datos se refieren al horizonte superficial (20 cm). MO: materia orgánica. CE: conductividad eléctrica.

Campo	Punto de muestreo	MO (%)	pH	CE (dS/m)
Vo-1	A media ladera	0.275	6.44	0.032
Vo-2	A media ladera	0.455	5.56	0.080
Vo-3	A media ladera	0.47	5.72	0.068

El material del suelo, que tiene mayoritariamente su origen en el desmantelamiento de los relieves cuarcíticos adyacentes, principalmente de la Cuarcita Armoricana de los Montes de Toledo, presentó un bajo contenido en materia orgánica, apenas 0.37%, elevada pedregosidad en superficie, así como elevadas pendientes y un drenaje alto. Se trata de un perfil de suelo poco desarrollado, muy alterado por la acción humana y con muchos rasgos de estar sometido a una fuerte erosión. La descripción sintética de los dos perfiles del suelo analizados puede verse en las tablas 5.12 y 5.13. Cabe destacar que la textura del suelo es arenosa, franco arenosa en todas las muestras tomadas menos en una. En Vo-1, a uno de los lados del campo (muestra Vo1-3), existen contenidos algo mayores de arena, lo cual hace que la textura presente sea una textura arenosa franca, que no parece relevante en el análisis global del suelo. Las mediciones de densidad aparente, mediante el método del cilindro, son para Vo-1 de 1.52, 1.61 y 1.38 g cm⁻³, una medida en cada una de las tres microcuencas a mitad de ladera (tabla 5.10). En este caso el valor inferior de densidad se corresponde con la zona con textura algo más arenosa, lo cual resulta congruente. Pese a este dato se puede considerar un suelo homogéneo en superficie, cuyo valor de densidad aparente media se considerará como la densidad aparente de todo el campo de estudio. En este caso dicho valor se corresponde con 1.53 g cm⁻³. En Vo-2 la muestra tomada ofrece un valor elevado de densidad aparente: 1.79 g cm⁻³ que ha sido determinado a partir de la toma de una muestra a media ladera; en el caso de Vo-3, las tres muestras obtenidas arrojan valores de 1.56, 1.48 y 1.87 g cm⁻³. Se considerará para los cálculos el valor medio de las muestras de Vo-2 y Vo-3: 1.64 g cm⁻³. Se unen ambos campos porque sus características son similares, ya que la variabilidad de los resultados no parece relevante y seguramente este asociada, en parte, a un error de procedimiento.

El cultivo desarrollado en los dos campos agrícolas estudiados es leñoso, de olivar. El suelo estaba desnudo en el momento de la precipitación.

Tabla 5.12: Descripción del perfil del suelo de Villarrubia de los Ojos Vo-1.

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL	Clasificación del suelo	FAO, 1989: Cambisol crómico (CMx)
	Localización	Termino municipal de Villarrubia De los Ojos. Ladera "Vo-1"
	Coordenadas	39° 15' 33.69" N, 3°37'24.45" W
	Altitud	658 m
	Posición fisiográfica	En pendiente
	Topografía del terreno circundante	Fuertemente ondulado, 8-16%. En pendiente planar.
	Pendiente	Escarpada, 13-25%
	Exposición	Oeste
	Material originario	Afloramiento aluvial de cuarcitas, que tienen su origen en la Cuarcita Armoricana procedente del desmantelamiento de los Montes de Toledo.
	Drenaje	Drenaje excesivo
	Condiciones de humedad	No llega a apreciarse humedad en el perfil
	Profundidad de la capa freática	Superior a 1 m
	Pedregosidad superficial	Alta, superior al 60%
	Afloramientos rocosos	No
	Evidencia de erosión	Si
	Influencia humana	Si, suelo agrícola
	Uso del suelo	Olivares. Suelo desnudo.

DESCRIPCIÓN DE LOS HORIZONTES	Breve descripción del perfil	El perfil del suelo presenta un total de 3 horizontes: Ap, Bw y C. Perfil poco desarrollado.
	Horizonte Ap	Hasta una profundidad de 18 cm. El límite inferior es neto plano. Color: 7.5YR 3/4 en húmedo. La estructura es débil, fina y granular, de consistencia muy friable. Presenta una porosidad elevada (<14/4 cm), de poros finos (1-2). La presencia de raíces es frecuente pero estas son muy finas.
	Horizonte Bw	Hasta una profundidad de 40 cm. El límite inferior es neto plano. Color: 10YR 5/4 en húmedo. La estructura es débil, fina y granular, de consistencia muy friable. La porosidad es elevada (<14/4 cm), con poros muy finos (<0.075-1), mientras las raíces son pocas y muy finas.
	Horizonte C	A partir de los 40 cm. Color: 5YR 5.5/8 en húmedo. Hay ausencia de estructura y de consistencia alguna. Las raíces son pocas y muy gruesas (>5mm).

Tabla 5.13: Descripción del perfil del suelo de Villarrubia de los Ojos Vo-2, que se toma como referencia a su vez de Vo-3.

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL	Clasificación del suelo	FAO, 1989: <i>Cambisol</i> crómico (CMx)
	Localización	Termino municipal de Villarrubia De los Ojos. Ladera "Vo-2"
	Coordenadas	39° 15' 17.90" N, 3° 37' 8.69" W
	Altitud	682 m
	Posición fisiográfica	En pendiente
	Topografía del terreno circundante	Fuertemente ondulado, 8-16%. En pendiente planar.
	Pendiente	Escarpada, 13-25%
	Exposición	Este
	Material originario	Afloramiento aluvial de cuarcitas, que tienen su origen en la Cuarcita Armoricana procedente del desmantelamiento de los Montes de Toledo.
	Drenaje	Drenaje excesivo
	Condiciones de humedad	No llega a apreciarse humedad en el perfil
	Profundidad de la capa freática	Superior a 1 m
	Pedregosidad superficial	Alta, superior al 60%
	Afloramientos rocosos	No
	Evidencia de erosión	Si
DESCRIPCIÓN DE LOS HORIZONTES	Influencia humana	Si, suelo agrícola
	Uso del suelo	Olivares. Suelo desnudo.
	Breve descripción del perfil	El perfil del suelo presenta un total de 3 horizontes: Ap, Bw y C. Perfil poco desarrollado.
	Horizonte Ap	Hasta una profundidad de 16 cm. El límite inferior es neto plano. Color: 7.5R 4/6 en húmedo. La estructura es moderada, migajosa con bloques subangulares, de consistencia friable. Presenta una porosidad elevada (<14/4 cm), de poros finos (0.075-2mm)). La presencia de raíces es frecuente pero estas son de muy finas a medias (<1.5mm).
DESCRIPCIÓN DE LOS HORIZONTES	Horizonte Bw	Hasta una profundidad de 30 cm. El límite inferior es neto plano. Color: 5YR en húmedo. La estructura es débil, muy fina con bloques angulares, de consistencia friable. La porosidad es elevada (<14/4 cm), con poros de diámetro 0.075-2mm. La presencia de raíces es frecuente pero estas son de muy finas a medias (<1.5mm).
	Horizonte C	A partir de los 30 cm. Color: 2.5YR 4/8 en húmedo. Hay ausencia de estructura, mientras la consistencia se sitúa entre friable y firme. Hay gran presencia de poros que son entre muy finos y finos. Sin presencia de raíces.

5.2.2.1.3. Caracterización de las laderas de estudio

En la ladera Vo-1 fueron individualizadas tres microcuencas con regueros dendríticos: Vo1-1, Vo1-2 y Vo1-3 (figura 5.17). En la ladera Vo-2 se estudió una única microcuenca de drenaje, Vo-2-1, en este caso, con desarrollo de regueros confinados, al igual que en la ladera Vo-3, donde se individualizaron hasta tres microcuencas: Vo3-1, Vo3-2 y Vo3-3 (figura 5.18).

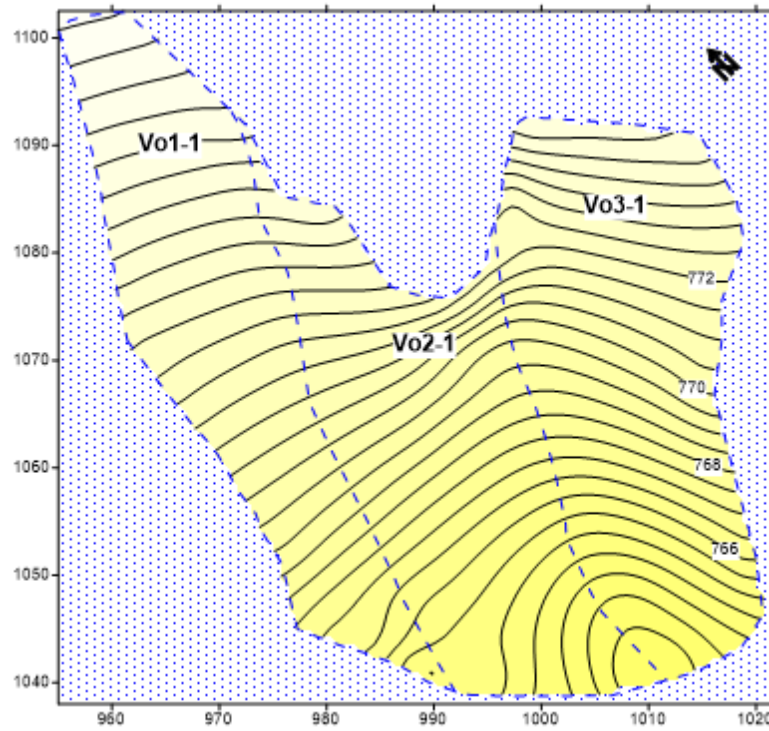


Figura 5.17: Mapa topográfico de Vo-1 donde puede observarse la división de las 3 microcuencas hidrológicas (en línea discontinua azul) con desarrollo de redes de regueros. La equidistancia entre curvas de nivel es de 0.5 m. La escala se presenta en metros.

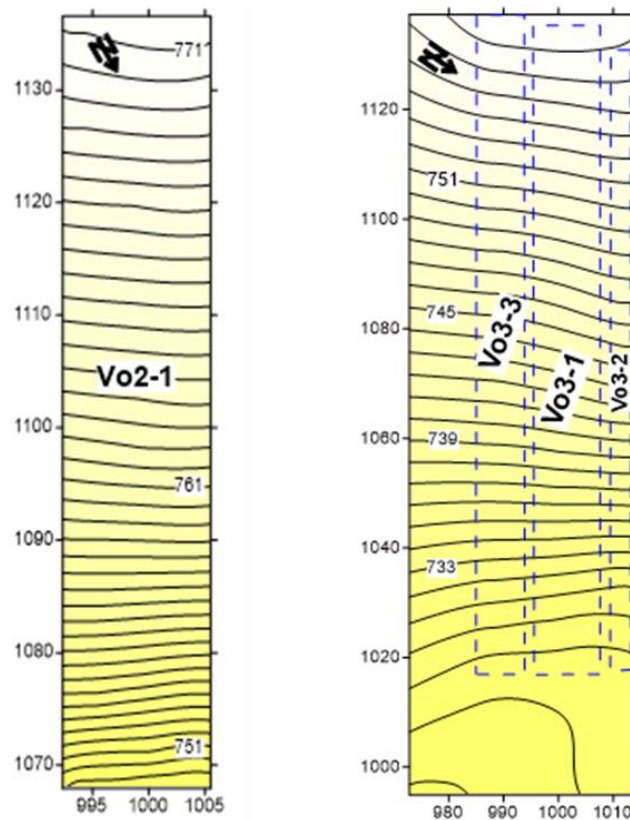


Figura 5.18: Mapa topográfico de Vo-2 y Vo-3 donde puede observarse la posición de las distintas microcuencas hidrológicas (en línea discontinua azul) con desarrollo de redes de regueros. En el caso de Vo-2 toda la superficie cartografiada es una microcuenca con desarrollo de regueros. La equidistancia entre curvas de nivel es de 0.5 m en el caso de Vo-2 y de 1 m en Vo-3. La escala se presenta en metros.

Para elaborar estos modelos digitales del terreno (figuras 5.17 y 5.18) se registraron las coordenadas relativas de 869 puntos mediante una estación total.

5.2.2.2. Caracterización de la precipitación desencadenante de la erosión del suelo

El evento tormentoso desencadenante de la erosión del suelo fue provocado, en mayo del 2007, por una supercélula convectiva que afectó principalmente a la comarca de La Mancha.

Las supercélulas convectivas son las estructuras convectivas con mayor grado de organización y eficiencia a la hora de generar tiempo severo, entendiendo por esto todos o cualquier combinación de los siguientes efectos en superficie: granizo mayor de 2 cm de diámetro, rachas de viento superiores a 98 km h^{-1} , inundaciones relámpago y tornados, todo ello en cualquier momento de su ciclo de vida (ver, por ejemplo, Burgess y Lemon, 1991 en Quirantes Calvo, 2008). Cuatro son los requisitos fundamentales para la formación de una supercélula convectiva como la que afectó a Villarrubia de los Ojos en mayo de 2007: a) Entornos ricos de marcada cizalladura vertical del viento (o de significativa helicidad relativa a la tormenta); b) Suficiente inestabilidad para la convección profunda; c) Humedad en capas bajas; d) Mecanismos de disparo apropiados (Forzamiento dinámico sinóptico y/o mesoescalar) (Quirantes Calvo, 2008). Suelen ser modelos tormentosos típicos en las grandes llanuras de Estados Unidos de Norteamérica o de Argentina, acompañadas en un buen número de casos de tornados, siendo menos habituales este tipo de tormentas en el clima mediterráneo, aunque no infrecuentes.

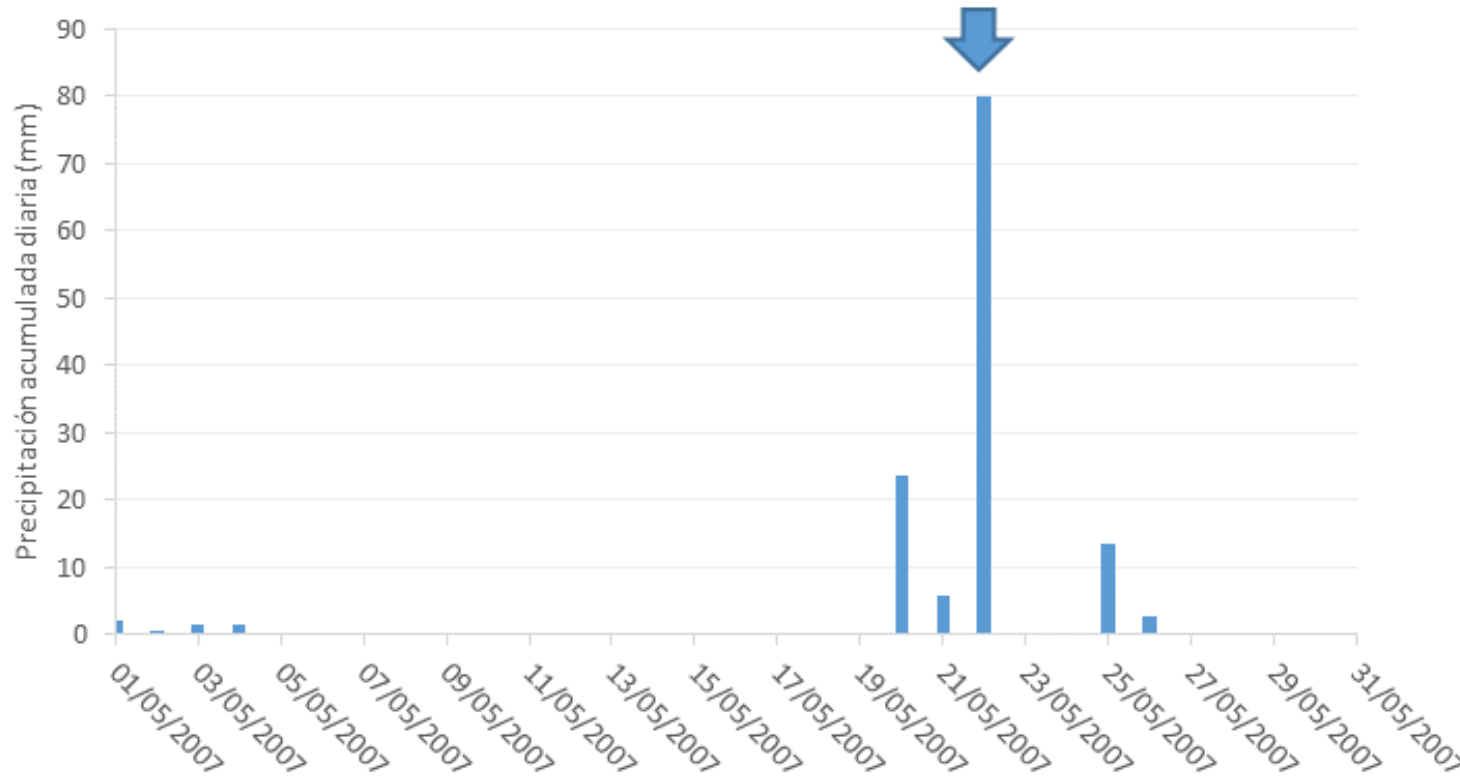
Este caso, conocido como la supercélula convectiva de Alcázar de San Juan, las precipitaciones más altas acumuladas se recogieron en la pedanía de Alameda de Cervera en Alcázar de San Juan, situada a 39 km de la zona de estudio, donde se llegaron a acumular 240 mm en 24 horas, con un período de retorno calculado en 500 años.

Los datos de precipitación en el caso de Villarrubia de los Ojos fueron obtenidos del observatorio de Villarrubia de los Ojos (Agencia Estatal de Meteorología, código 4112A) situada a unos 5 kilómetros de la zona de estudio. La precipitación desencadenante de la erosión fue la del 22 de mayo de 2007, día en el que se llegaron a acumular 80 mm en 24 horas en esta estación (figura 5.19).

En la zona de estudio, para la serie de 69 años (periodo 1946-2006) la precipitación media anual fue de 436 mm. Considerando dicho valor de precipitación anual media, la precipitación desencadenante de la erosión estudiada, 80 mm, supone en torno al 18% de la precipitación anual media. Con los datos de precipitación históricos anteriormente citados se ha establecido un periodo de retorno de la precipitación de 27 años (Memoria técnica del Informe final MANERO, 2008). No se han podido conseguir datos de la precipitación de periodos de tiempo menores a las 24h pero, según todos los testimonios de la zona consultados, dicha precipitación habría ocurrido en menos de una hora, algo congruente con el tipo de precipitación ocurrida.

Si se considera que los 80 mm de precipitación recogidos en Villarrubia de los Ojos se produjeron en el lapso temporal de una hora o menos, se puede decir que la precipitación del 22 de mayo de 2007 se trata de un evento extremo de precipitación. Según la Agencia Estatal de Meteorología se considera una lluvia extrema a una acumulación de agua superior a 60 mm en una hora.

Pluviograma (Villarrubia de los Ojos)



Página anterior: Figura 5.19: Pluviograma de precipitación acumulada en 24 horas para el periodo de estudio (mayo de 2007) en Villarrubia de los Ojos. La erosión se desencadenó a partir de la lluvia del día 22 de mayo (FLECHA).



Foto 5.7: En las fotografías superior e intermedia puede apreciarse un aspecto general de la erosión producida en los campos de olivos situados en las cercanías de Villarrubia de los Ojos. La presencia de canales de diferentes dimensiones era una constante en todos los olivares de la zona. En la fotografía inferior, detalle de una de las múltiples incisiones producidas. También en esta fotografía puede apreciarse la alta pedregosidad existente en el suelo.

El evento de lluvia y granizo fue tan destructivo que el Ayuntamiento solicitó la declaración de zona catastrófica, ya que fueron calculadas unas pérdidas de más de 12 millones de euros entre los daños sufridos en las viviendas, las infraestructuras viarias y los campos de cultivo de la localidad. Las cosechas se perdieron por el intenso granizo, y parte de los suelos de los campos de cultivo fueron totalmente arrasados por la erosión hídrica, ya que los cultivos predominantes son olivares y viñedos, con suelos desnudos y especialmente susceptibles a la erosión (Foto 5.7).

5.2.2.3. Resultados

5.2.2.3.1. Villarrubia de los Ojos campo 1 (Vo-1)

En la ladera Vo-1 se identificó una intensa reguerización con morfología en planta dendrítica (foto 5.8). Sobre la misma se individualizaron hasta tres microcuencas (Vo1-1, Vo1-2 y Vo1-3).



Foto 5.8: Aspecto general de Vo-1. Fácilmente distinguibles las redes de regueros que van capturándose unas a otras aguas abajo.

Geométricamente el campo de cultivo definía un plano inclinado con algunas irregularidades que pueden observarse en el modelo digital del terreno (figura 5.19), pero sin presencia de vaguadas definidas. El cierre superior era irregular y no respondía a un cambio de la dirección de la pendiente, sino a estar en contacto con una ladera no labrada y que presentaba una cubierta vegetal importante. Este hecho, y la no observación de rasgo alguno de flujo de escorrentía, hicieron descartar una entrada de escorrentía por la parte superior del olivar.

El campo agrícola estudiado abarcaba un total de 0.25 ha con una pendiente media elevada, del 20.8%. En la tabla 5.14 pueden observarse algunos valores topográficos relevantes para la caracterización de las superficies de estudio.

Tabla 5.14: Características topográficas de las superficies de estudio.

	Área (m ²)	Pendiente media (%)	Pendiente máxima (%)	Longitud de la microcuenca (m)	Desnivel máximo (m)	Aparición primer reguero (m)
Vo1-1	740.83	18.2	37.6	65.9	12.0	2.04
Vo1-2	830.4	21.0	29.3	49.17	10.3	1.3
Vo1-3	911.78	23.3	28.3	51.03	11.9	3.44
Vo-1 (total)	2483.01	20.8	37.6	65.9	12.0	1.3

La cartografía de la red de regueros permite visualizar la distribución espacial de la red a lo largo de la superficie de Vo-1 (figura 5.19). Inicialmente se pueden resaltar dos aspectos: la cercanía entre la divisoria superior de aguas y la aparición de los primeros regueros y una importante densidad de drenaje. Ambas apreciaciones se confirman al observar los resultados, ya que la aparición de los primeros regueros se producen entre 1.3 y 3.44 m y las densidades de drenaje corresponden a 0.290, 0.446 y 0.359 m m⁻² para Vo1-1, Vo1-2 y Vo1-3, respectivamente (tabla 5.14).

El resultado de la cubicación de la erosión llevada a cabo en estas tres microcuencas aparece en la tabla 5.15. La pérdida total de suelo por el desarrollo de incisiones fue de 23.38, 37.09 y 30.91 m³ para Vo1-1, Vo1-2 y Vo1-3, respectivamente; lo que en relación con la superficie supuso unas tasas de erosión de suelo por flujos concentrados realmente elevadas: 465.33, 595.54 y 463.38 Mg ha⁻¹, para los tres casos de estudio. La tasa de erosión anual equivalente, considerando el periodo de retorno que se ha calculado para el evento erosivo, 27 años, e incluyendo la erosión laminar estimada como el 20% (Poesen et al., 1997; De Alba, 1998)) fue también muy elevada: 21.06, 26.96 y 20.98 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (tabla 5.15). Considerando la totalidad de Vo-1 la pérdida de suelo por cárcavas y regueros se elevó hasta los 91.38 m³, la estimación de la erosión laminar se situó en 125.13 m³ lo cual ofrece una tasa de erosión anual equivalente final de 25.49 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (tabla 5.15). Cabe recordar que esta cifra representa la erosión mínima asociada al evento de precipitación.

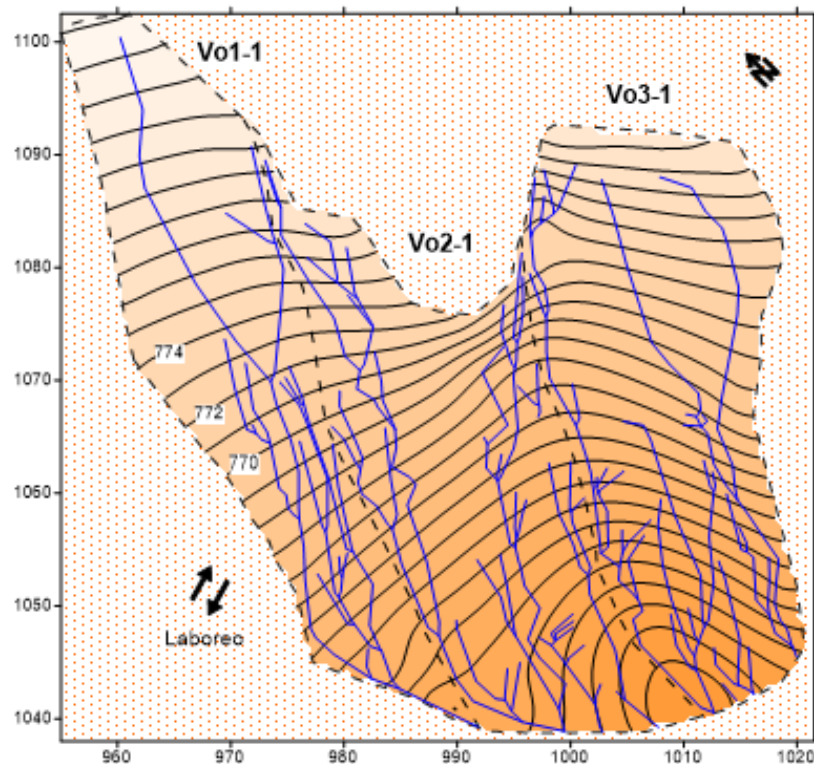


Figura 5.19: Mapa topográfico de Vo-1 con la división de las 3 microcuencas consideradas y la posición de la red dendrítica de regueros desarrollados. La equidistancia entre curvas de nivel es de 1 m. La escala se presenta en metros.

Como ya se ha indicado anteriormente, se trata de un suelo con textura franco arenosa, con la excepción de Vo1-3, donde existe una presencia más elevada de arena dando una textura arenosa franca. Esta pequeña modificación textural no parece inducir, según los valores expuestos y la cartografía de regueros observada, un distinto comportamiento del suelo frente a la erosión sobre Vo1-3, ya que la densidad de drenaje se mantiene similar en las tres microcuencas, así como los valores medios de sección de los canales.

En este caso, los surcos de labor se orientaron de forma oblicua a la máxima pendiente existente sobre el campo, como puede observarse en la figura 5.19.

Tabla 5.15: Resumen de la erosión por regueros en las microcuencas de Vo-1.

Cuenca	Fecha	Evento de lluvia erosivo (mm)	Estado del suelo previo a la erosión. Dirección surcos labor	Cárcava y/o reguero										EL	ET	TEAE
				L (m)	Número de cabeceras	D.D. (m m ⁻²)	Sección			R.A.P.		Erosión				
							Media (m ²)	c.v.	n	Media	c.v.	V (m ³)	Mg ha ⁻¹			
Vo-1-1	22 de mayo de 2007	80	Desnudo. Oblicuos a m.p.	216.97	16	0.290	0.1070	1.14	90	2.88	1.28	23.38	465.33	103.41	568.7	21.06
Vo-1-2	22 de mayo de 2007	80	Desnudo. Oblicuos a m.p.	370.24	35	0.446	0.086	1.08	187	3.14	0.77	37.09	595.54	132.34	727.9	26.96
Vo-1-3	22 de mayo de 2007	80	Desnudo. Oblicuos a m.p.	327.83	33	0.359	0.090	0.95	166	1.73	0.87	30.91	463.38	102.97	566.4	20.98
Vo-1 (total)	22 de mayo de 2007	80	Desnudo. Oblicuos a m.p.	915.04	84	0.368	0.094	1.06	443	2.58	0.97	91.38	563.07	125.13	688.2	25.49

Siendo: L: longitud; D.D.: densidad de drenaje; c.v.: coeficiente de variación; n: número de secciones medidas; R.A.P.: relación anchura-profundidad; V: volumen; c.n.: curvas de nivel; EL: Erosión laminar estimada; ET: erosión total; TEAE: Tasa de erosión anual equivalente (relación entre la tasa de erosión del evento y el periodo de retorno de la precipitación que la ha generado).

5.2.2.3.2. Villarrubia de los Ojos campos 2 y 3 (Vo-2 y Vo-3)

Sobre las laderas Vo-2 y Vo-3 se caracterizaron un total de cuatro microcuencas con rasgos de erosión por regueros confinados en los surcos de labor (foto 5.9).



Foto 5.9: Vista de la ladera Vo-3 donde se aprecia la dirección de los surcos de labor que han sido profundizados por el flujo de agua produciendo la formación de redes de regueros confinados.

Los campos de cultivo, al igual que en el caso de la ladera Vo-1, geométricamente dibujaban una superficie plana cuyo límite superior estaba determinado por la existencia de vegetación silvestre. Vo-2 y Vo-3, conjuntamente, abarcaban un total de 0.34 ha, con pendientes medias entre el 24.7 y el 29.5%. En la tabla 5.16 pueden observarse algunos valores topográficos relevantes para la caracterización de las superficies erosionadas.

Tabla 5.16: Características topográficas de las superficies de estudio.

	Área (m ²)	Pendiente media (%)	Pendiente máxima (%)	Longitud de la microcuenca (m)	Desnivel máximo (m)	Aparición primer reguero (m)
Vo2-1	538.91	29.5	37.6	66.70	19.68	6.82
Vo3-1	1437.62	24.9	32.6	118.35	29.44	28.55
Vo3-2	394.69	25.1	34.6	113.12	28.45	6.84
Vo3-3	1053.42	24.7	29.5	120.43	29.81	55.55
Vo-2-3 (total)	3424.64	26.05	37.6	120.43	29.81	6.82

El resultado de la cubicación del suelo perdido en las laderas Vo-2 y Vo-3 puede verse en la tabla 5.17. La pérdida total de suelo por el desarrollo de incisiones fue de 17.31, 19.14, 20.0 y 7.24 m³ para Vo2-1, Vo3-1, Vo3-2 y Vo3-3, respectivamente; lo que en relación con la superficie supone unas tasas de erosión de suelo por flujos concentrados de 526.77, 207.69, 749.95 y 128.52 Mg ha⁻¹, para los cuatro casos de estudio. La tasa de erosión anual equivalente, considerando el periodo de retorno que se ha calculado para el evento erosivo, 27 años, e incluyendo la erosión laminar estimada, fue de 23.85, 9.40, 33.95 y 5.82 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (tabla 5.17). El volumen total de suelo desalojado por el desarrollo de regueros, considerando las cuatro microcuencas de Vo-2 y Vo-3 como un único elemento de análisis, fue de 63.69 m³, lo que en relación con la superficie drenada supuso una tasa de erosión de suelo de 305 Mg ha⁻¹. La tasa de erosión anual equivalente, considerando el periodo de retorno que se ha calculado para el evento erosivo (27 años) y la erosión laminar estimada fue, en este caso, de 13.81 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (tabla 5.17). Cabe recordar, nuevamente, que esta cifra representa la erosión mínima asociada al evento de precipitación.

En estos cuatro casos, la dirección del laboreo seguida fue a favor de la máxima pendiente.

Tabla 5.17: Resumen de la erosión por regueros en las microcuencas de Vo-2 y Vo-3.

Cuenca	Fecha	Evento de lluvia erosivo (mm)	Estado del suelo previo a la erosión. Dirección surcos labor	Cárcava y/o reguero										EL	ET	TEAE
				L (m)	Número de cabeceras	D.D. (m m ⁻²)	Sección			R.A.P.		Erosión				
							Media (m ²)	c.v.	n	Media	c.v.	V (m ³)	Mg ha ⁻¹			
Vo-2-1	22 de mayo de 2007	80	Desnudo. Paralelos a m.p.	460.09	12	0.85	0.0422	0.94	48	2.54	0.47	17.31	526.77	117.06	643.8	23.85
Vo-3-1	22 de mayo de 2007	80	Desnudo. Paralelos a m.p.	337.3	8	0.23	0.0471	1.26	46	2.82	0.52	19.14	207.69	46.15	253.8	9.40
Vo-3-2	22 de mayo de 2007	80	Desnudo. Paralelos a m.p.	469.73	8	1.19	0.0456	1.27	51	2.58	0.56	20.00	749.95	166.66	916.6	33.95
Vo-3-3	22 de mayo de 2007	80	Desnudo. Paralelos a m.p.	218.57	6	0.21	0.0362	0.78	23	2.78	0.49	7.24	128.52	28.56	157.1	5.82
Vo-2-3 (total)	22 de mayo de 2007	80	Desnudo. Paralelos a m.p.	1148.39	34	0.43	0.043	1.06	168	2.68	0.51	63.69	305.00	67.78	372.8	13.81

Siendo: L: longitud; D.D.: densidad de drenaje; c.v.: coeficiente de variación; n: número de secciones medidas; R.A.P.: relación anchura-profundidad; V: volumen; c.n.: curvas de nivel; EL: Erosión laminar estimada; ET: erosión total; TEAE: Tasa de erosión anual equivalente (relación entre la tasa de erosión del evento y el periodo de retorno de la precipitación que la ha generado).

Llama la atención la irregularidad de los valores de tasa de erosión en función de la microcuenca estudiada. Sin embargo no existen diferencias topográficas (de pendiente, longitud, etc.), ni en las características de los suelos que justifiquen esta irregularidad (tablas 5.14 y 5.16). Sí que se observa una gran diferencia en las distancias de aparición del primer reguero (tabla 5.16), lo cual propicia importantes diferencias entre los valores de densidad de drenaje (tabla 5.17), que, a su vez, propician, las diferencias en las tasas de erosión observadas. Esta diferencia en la distancia de aparición del primer reguero desde la divisoria superior de aguas, así como en las densidades de drenaje se ven reflejadas en la distribución espacial de las redes de regueros a lo largo de las diferentes superficies de Vo-2 y Vo-3 (figura 5.20).

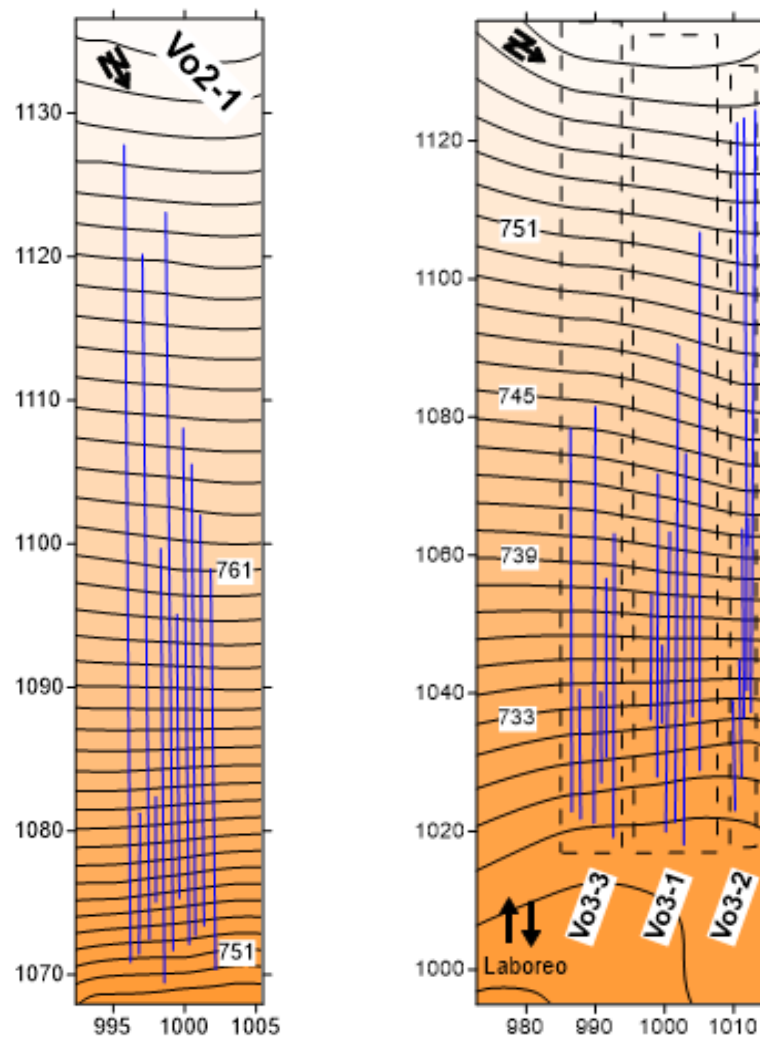


Figura 5.20: Mapa topográfico de las microcuencas Vo2-1 (izquierda) y Vo3-1, Vo3-2 y Vo3-3 (derecha) con la posición de los regueros cartografiados. La equidistancia entre curvas de nivel es de 0.5 m en el caso de Vo-2 y de 1 m en Vo-3. La escala se presenta en metros.

Sobre Vo2-1 y Vo3-2 los regueros inciden a una distancia próxima a la divisoria superior de aguas, sobre Vo3-1 y Vo3-3, inciden a mucha mayor distancia, lo cual está directamente relacionado con las diferencias entre los valores de densidad de drenaje. Mientras en Vo3-2 se produce la mayor densidad con hasta 1.19 m m^{-2} , en el caso de Vo3-3 este valor se reduce hasta los 0.21 m m^{-2} . Como ya se ha concluido anteriormente, estas diferencias no pueden explicarse ni en términos topográficos ni de características del suelo. Una posible explicación a estas diferencias puede encontrarse en la alta pedregosidad del suelo, que provoca una diferente respuesta erosiva en cada una de las microcuencas.

La alta pedregosidad, con fragmentos de rocas de ciertas dimensiones en algunos casos y una distribución caótica sobre las superficies estudiadas, ejerce un efecto de protección del suelo, pero lo ejerce de forma irregular dada su distribución heterogénea sobre la superficie. Ante precipitaciones de alta intensidad, como la que desencadenó este episodio erosivo, con una alta energía cinética, la pedregosidad evita el impacto de las gotas de lluvia sobre el suelo y con ello el arranque de pequeñas partículas que movilizadas por la escorrentía superficial harán dicho flujo más erosivo. En este aspecto, ejercen el mismo efecto que la presencia de recubrimiento vegetal.

Se ha podido establecer para una gran amplitud de escalas espaciales, tipos de suelo, climas y vegetación, que las producciones de escorrentía y sedimentos disminuyen conforme aumenta el porcentaje de recubrimiento del suelo (ver, por ejemplo, Elwel y Stocking, 1976; De Ploey, 1989; Francis y Thornes, 1990; Roxo, 1994; Bochet et al., 1998; Durán Zuazo et al. 2006), ajustándose normalmente la relación entre la cobertura vegetal y la tasa de erosión hídrica a una curva exponencial negativa (ver, por ejemplo, Elwel y Stocking, 1976; Lee y Skogerboe, 1985; Francis y Thornes, 1990). Así, junto con la irregularidad espacial y temporal de las precipitaciones, la topografía, la variabilidad espacial de las características superficiales y propiedades físicas de los suelos y la humedad antecedente del suelo, la presencia y densidad de la cubierta vegetal es considerada como uno de los factores relevantes que controlan la generación de escorrentía en medios semiáridos (ver, por ejemplo, Castillo et al., 2000).

Si los fragmentos rocosos, además, se encuentran acumulados en la parte superior de las microcuencas de drenaje y ubicados dentro de los surcos de labor dificultan el flujo de escorrentía, desviándolo de su recorrido natural aguas abajo. Este hecho impide la sobre-excavación del surco, desplazando el comienzo de los regueros aguas abajo. De esta manera, disminuye la longitud de los regueros, que incidirán en posiciones más alejadas de la divisoria superior de aguas. Donde no se acumulan estos fragmentos de roca sobre los surcos, o lo hacen en menor medida, la escorrentía superficial que fluye por el fondo de los surcos de labor no encontrará ninguna oposición y allí donde alcance el esfuerzo cortante crítico sobre-excavará el surco.

5.2.3. Episodio erosivo en Paracuellos del Jarama y Ajalvir, Comunidad de Madrid

5.2.3.1. Descripción del área de estudio

5.2.3.1.1. *Marco fisiográfico*

Los municipios de Paracuellos del Jarama y Ajalvir se sitúan dentro de la Comunidad de Madrid, a unos 20 km al Noreste de la ciudad de Madrid (figura 5.21). Se trata de dos municipios colindantes. Ambos municipios se sitúan en la cuenca del Jarama, dentro de la Cuenca Hidrográfica del Tajo. La zona de estudio presenta relieves suavemente alomados con pendientes moderadas.



Figura 5.21: Situación de Paracuellos del Jarama y Ajalvir dentro de la Comunidad de Madrid.
Modificado de <https://wikipedia.org>

Paracuellos del Jarama, que cuenta con 4392 ha de superficie y una población algo superior a los 20000 habitantes, se sitúa dentro de la Comarca Agrícola del Área Metropolitana de Madrid. Se trata de una localidad eminentemente industrial, pero que cuenta con 1274.65 ha dedicadas a explotaciones agrícolas, lo que supone el 29% de su superficie total. Dentro de éstas, 838.49 ha son de cultivos herbáceos, el 65.78% del total de tierras cultivadas, con 396.46 ha para pastos permanentes y 39.65 ha calificadas como otras tierras (Censo Agrario del Instituto Nacional de Estadística, 2009).

Ajalvir, al Este de Paracuellos del Jarama, cuenta con algo más de 4000 habitantes y una clara vocación Ajalvir se sitúa dentro de la Comarca Agrícola de la Campiña, en el límite con la Comarca Agrícola del Área Metropolitana de Madrid. De sus 1962 ha de superficie, hasta 1784 ha son tierras labradas, lo que supone casi el 91% de la superficie total del término municipal. La práctica totalidad de estas superficies están dedicadas a cultivos herbáceos de secano, quedando 9 ha para pastos permanentes y otras 9 ha que están calificadas como otras tierras (Censo Agrario del Instituto Nacional de Estadística, 2009).

En ambos términos municipales se han estudiado tres campos agrícolas, dos en Ajalvir y una en Paracuellos del Jarama, en los que han sido caracterizados y cuantificados rasgos de erosión después de una importante precipitación que se produjo el 21 de septiembre de 2008 y que afectó a ambos municipios.

En el caso del campo estudiado en Paracuellos del Jarama, debido a su extensión, la alta densidad de regueros presentes y la limitación temporal existente a la hora de la toma de datos en campo, se decidieron individualizar, para su estudio, cuatro microcuencas con diferentes características. Dichas superficies se denominarán en adelante Pj-1, Pj-2, Pj-3 y Pj-4, y abarcaron 1017.76, 2004.28, 1182.96 y 2890.72 m², respectivamente. El campo agrícola de estudio en Paracuellos se situó en la zona Nororiental del término municipal, junto a la autovía M-50 siendo visible desde ésta.

Los dos campos de cultivo estudiados en Ajalvir, que se han nombrado como Aj-1 y Aj-2, se localizaban al Norte del núcleo urbano, junto a la carretera M-108 (figura 5.22). La ladera Aj-1 presentó una superficie total de 11006.76 m², mientras la ladera Aj-2, sensiblemente menor en superficie, se extendía a lo largo de 3057.92 m².

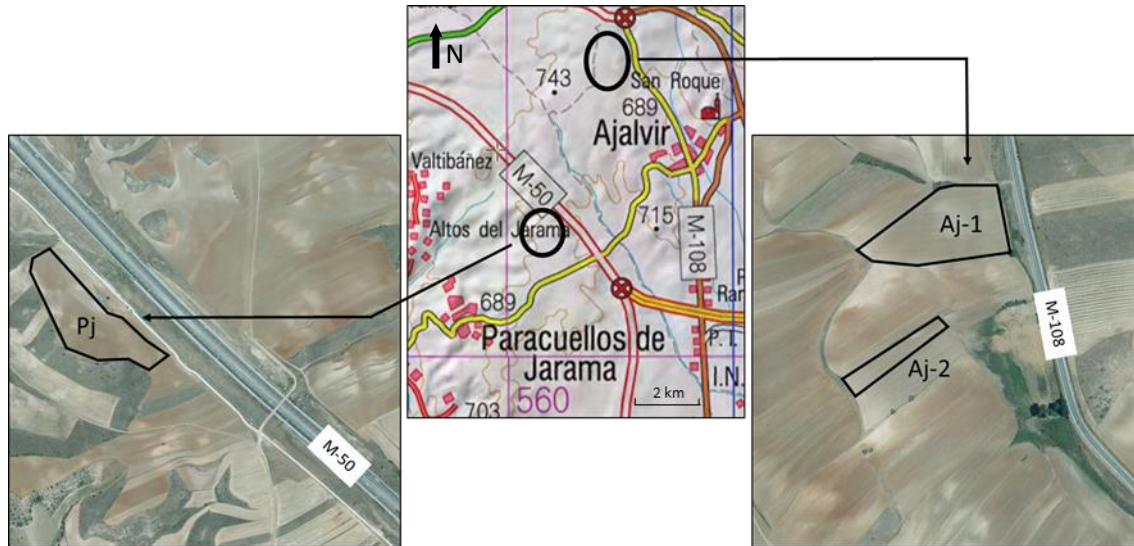


Figura 5.22: Situación de los tres campos agrícolas de estudio Aj-1, Aj-2 y Pj (Paracuellos del Jarama). Aj-1 se sitúa a 40° 32' 55.42" N de latitud y 3° 29' 44.52" W de longitud, Aj-2 se sitúa a 40° 32' 49.87" N de latitud y 3° 29' 47.23" W de longitud y Pj se sitúa a 40° 31' 40.11" N de latitud y 3° 31' 9.62" W de longitud. Fuente: Visor SIG-PAC. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA).

5.2.3.1.2. Edafología y usos del suelo

Para la caracterización del suelo de los tres campos agrícolas de estudio se describieron dos perfiles edáficos: uno en la ladera Aj-1, que ha de servir de referencia también para Aj-2 dada la proximidad de ambos campos de cultivo, y otro en la ladera de Paracuellos. A esta información se añadió la toma de siete muestras de superficie (primeros 20 cm) en cada una de las seis localizaciones, tomándose por partida doble en el caso de Aj-1 debido a la dimensión del campo estudiado, para la obtención de la densidad aparente del suelo. Las tablas 5.18 y 5.19 resumen las principales características físico-químicas de los suelos de estos dos campos agrícolas.

Tanto tectónica como sedimentológicamente el área de estudio es, en rasgos generales, equivalente al descrito anteriormente para Arroyomolinos. El material del suelo, que tiene, nuevamente, su origen en las arcosas procedentes de la erosión de los granitos y rocas metamórficas de la Sierra de Guadarrama, presentó en este caso un contenido en materia orgánica algo superior. En el caso de Paracuellos del Jarama, 1.22% de media para las cuatro muestras estudiadas, mientras en Ajalvir el valor se situó en 0.72%. Se trata, en ambos casos, de contenidos en materia orgánica muy bajos. Destaca la escasa pedregosidad presente sobre las superficies estudiadas y una estructura en ambos perfiles de suelo que hace que se trate de suelos moderadamente bien drenados, con un contenido en arcilla relativamente importante, mayor en el caso de Paracuellos del Jarama.

Tabla 5.18: Propiedades físicas de los suelos muestreados en las laderas de Paracuellos del Jarama y Ajalvir. Los datos se refieren al horizonte superficial (20 cm). a: arena (2-0.05 mm); l: limo (0.05-0.002 mm); arc: arcilla (< 0.002 mm). ρ_a : densidad aparente.

Campo	Punto de muestreo	a (%)	l (%)	Arc (%)	Textura (USDA)	ρ_a (gr cm ⁻³)
Pj-1	A media ladera	51.15	9.56	39.28	Franco arcillosa	1.39
Pj-2	A media ladera	48.55	9.87	41.57	Arcillo arenoso	1.36
Pj-3	A media ladera	61.50	9.24	29.26	Franco arcillo-arenosa	1.42
Pj-4	A media ladera	51.50	12.97	35.55	Franco arcillosa	1.35
Aj-1	Zona superior ladera	64.16	8.96	26.88	Franco arcillo arenosa	1.53
Aj-1	Zona inferior ladera	52.20	12.92	34.88	Franco arcillo arenosa	1.32
Aj-2	A media ladera	57.25	13.99	28.76	Franco arcillo arenosa	1.24

Tabla 5.19: Propiedades químicas de los suelos muestreados en las laderas de Paracuellos del Jarama y Ajalvir. Los datos se refieren al horizonte superficial (20 cm). Solo se han analizado los cationes de cambio en una de las muestras para cada una de las laderas. MO: materia orgánica. CE: conductividad eléctrica. CIC: Capacidad de intercambio catiónico. RAS: Relación de adsorción de sodio.

Campo	Punto de muestreo	MO (%)	pH	CE (dS/m)
Pj-1	A media ladera	0.92	6.55	0.080
Pj-2	A media ladera	1.52	6.38	0.102
Pj-3	A media ladera	1.11	8.16	0.137
Pj-4	A media ladera	1.34	5.06	0.505
Aj-1	Zona superior ladera	0.71	7.77	0.098
Aj-1	Zona inferior ladera	0.85	8.39	0.166
Aj-2	A media ladera	0.61	8.28	0.174

Campo	Ca ²⁺ (cmol/Kg)	Mg ²⁺ (cmol/Kg)	Na ⁺ (cmol/Kg)	K ⁺ (cmol/Kg)	CIC (cmol/Kg)	RAS
Aj	10.4	0.61	0.1	0.3	12.66	0.04
Pj	5.23	1.52	0.15	0.42	13.13	0.08

Una descripción sintética del perfil del suelo puede verse en las tablas 5.20 y 5.21. Se trata de un suelo eminentemente agrícola, muy alterado por la acción humana y con muchos rasgos de estar sometido a una fuerte erosión. De hecho, toda la zona parece sometida a una fuerte erosión si se toman como referencia las múltiples manchas de color claro presentes en las partes más altas de los campos agrícolas de la zona que pueden verse en la figura 5.22. Estas manchas anuncian horizontes originalmente subsuperficiales que quedan expuestos en superficie por la erosión y la pérdida del horizonte superficial, lo que da como resultado la existencia de horizontes truncados característicos de las áreas sometidas a una importante erosión.

La densidad aparente presenta un promedio de 1363 kg m^{-3} para el caso de Ajalvir (considerando ambas laderas como un suelo con similares características) y de 1380 kg m^{-3} en el caso de Paracuellos del Jarama.

El cultivo habitual en los dos campos agrícolas estudiados es herbáceo, cereal, que suele sembrarse entre octubre y noviembre previa preparación del suelo con cultivador. En este caso, en el momento en que se produjo la precipitación, el suelo estaba desnudo debido a que se encontraba en espera de ser sembrado.

Tabla 5.20: Descripción del perfil del suelo de Aj-1, que se toma como referencia también para Aj-2.

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL	Clasificación del suelo	FAO, 1989: <i>Luvisol cutánico (LVct)</i>
	Localización	Termino municipal de Ajalvir. Ladera "Aj-1"
	Coordenadas	40° 32' 55.42" N, 3° 29' 44.52" W
	Altitud	504 m
	Posición fisiográfica	En pendiente
	Topografía del terreno circundante	Fuertemente ondulado, 8-16%. En pendiente planar.
	Pendiente	6-13%
	Exposición	Este
	Material originario	Arcosas procedentes de la erosión de granitos y rocas metamórficas de la Sierra de Guadarrama
	Drenaje	Moderadamente bien drenado
	Condiciones de humedad	No llega a apreciarse humedad en el perfil
	Profundidad de la capa freática	Superior a 2 m
	Pedregosidad superficial	Inexistente
	Afloramientos rocosos	No
	Evidencia de erosión	Si
	Influencia humana	Si, suelo agrícola
	Uso del suelo	Cultivo herbáceo. Suelo desnudo.
DESCRIPCIÓN DE LOS HORIZONTES	Breve descripción del perfil	El perfil del suelo, presenta un total de 3 horizontes: Ap, B y Btk.
	Horizonte Ap	Hasta una profundidad de 20 cm. El límite inferior es gradual difuso. Color: 7.5R 4/6 en húmedo. La estructura es débil, mediana con bloques angulares, de consistencia muy friable. Muchos poros, muy finos y finos con una disposición caótica. La presencia de raíces es frecuente pero estas son de muy finas a medias (<1.5mm).
	Horizonte B	Hasta una profundidad de 60 cm. El límite inferior es neto plano. Color: 7.5 YR 3/4 en húmedo. La estructura es moderada, gruesa con bloques angulares, de consistencia friable. Muchos poros, muy finos y finos con distribución caótica, tanto interagregados como intraagregados. La presencia de raíces es frecuente, siendo estas muy finas.
	Horizonte Btk	A partir de los 60 cm. Color: 7.5 YR 4/6 en húmedo. Estructura moderada-fuerte, gruesa con bloques angulares, mientras la consistencia es dura. Hay gran presencia de poros que son muy finos y finos con distribución caótica en interagregados. Con escasa presencia de raíces que son muy finas.

Tabla 5.21: Descripción del perfil del suelo de Paracuellos del Jarama.

DESCRIPCIÓN DEL PERFIL	Clasificación del suelo	FAO, 1989: <i>Luvisol cutánico (LVct)</i>
	Localización	Termino municipal de Paracuellos del Jarama. En un lado de la ladera de estudio, aprovechando un corte del terreno por la presencia de un pequeño cauce.
	Coordenadas	40° 31' 40.11" N, 3° 31' 9.62" W
	Altitud	689.5 m
	Posición fisiográfica	En un corte natural del terreno provocado por el cauce de un arroyo.
	Topografía del terreno circundante	Fuertemente ondulado
	Pendiente	8-16%.
	Exposición	Este
	Material originario	Arcosas procedentes de la erosión de granitos y rocas metamórficas de la Sierra de Guadarrama
	Drenaje	Moderadamente bien drenado
	Condiciones de humedad	No llega a apreciarse humedad en el perfil
	Profundidad de la capa freática	Superior a 2 m
	Pedregosidad superficial	Inexistente
	Afloramientos rocosos	No
	Evidencia de erosión	Si
DESCRIPCIÓN DE LOS HORIZONTES	Influencia humana	Si, suelo agrícola
	Uso del suelo	Cultivo herbáceo. Suelo desnudo.
	Breve descripción del perfil	El perfil del suelo está muy desarrollado con 3 horizontes diferenciados: Ap, Bt1 y Bt2.
	Horizonte Ap	Hasta una profundidad de 20 cm. El límite inferior es gradual plano. Color: 10YR 3/4 en húmedo. La estructura es Débil, fina-mediana con bloques angulares, de consistencia friable. Muchos poros, muy finos y finos con una disposición caótica en interagregados e intraagregados. La presencia de raíces es abundante pero estas muy finas y finas.
	Horizonte Bt1	Hasta una profundidad de 75 cm. El límite inferior es neto ondulado. Color: 10YR 3/4 en húmedo. La estructura es moderada, media-gruesa con bloques angulares, de consistencia friable. Muchos poros, muy finos y finos con distribución caótica, tanto interagregados como intraagregados. La presencia de raíces es frecuente, siendo estas muy finas.
	Horizonte Bt2	A partir de los 75 cm. Color: 10YR 4/4 en húmedo. Estructura fuerte-gruesa con bloques angulares, mientras la consistencia es firme. Hay gran presencia de poros que son muy finos y finos con distribución caótica en interagregados e intraagregados. Con escasa presencia de raíces que son muy finas.

5.2.3.1.3. Caracterización de las laderas de estudio

En la ladera estudiada en Paracuellos del Jarama se individualizaron cuatro microcuencas, buscando representarlas diferentes características de los rasgos erosivos presentes (figura 5.23).

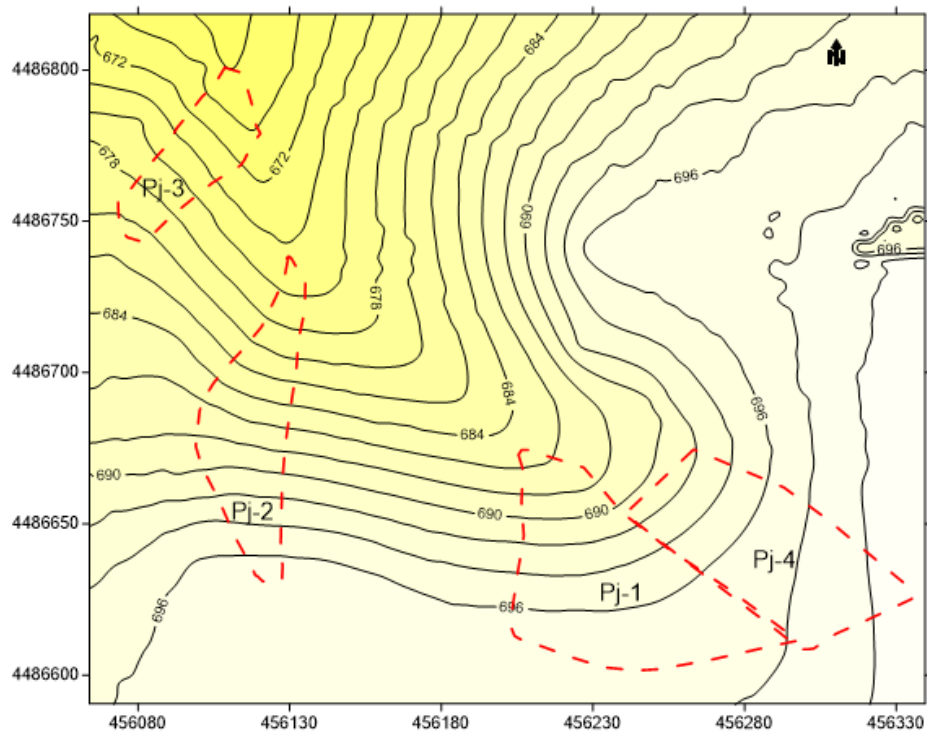


Figura 5.23: Mapa de curvas de nivel del campo agrícola caracterizado en Paracuellos del Jarama donde pueden observarse los límites de las cuatro microcuencas hidrológicas (en línea discontinua roja). La equidistancia entre las curvas de nivel es de 2 m. La escala del mapa se corresponde con las coordenadas UTM en m.

El campo de cultivo caracterizado en Paracuellos presentó forma de cuenca cóncava asimétrica, muy abierta, con cierre en forma semicircular. Se ha descrito como asimétrica porque uno de los laterales del campo, la ladera derecha, aguas abajo desde la cabecera, no está labrada debido a su elevada pendiente. Este hecho hace que la morfología de la zona de cultivo en lugar de presentar una forma de “U” cóncava clásica, presente forma de “L”. Al haberse mantenido constante la dirección de laboreo sobre la totalidad del campo de cultivo (lo cual puede observarse a través de las marcas de rodadas del tractor en la foto 5.10) se produjeron diferentes combinaciones en el ángulo entre la dirección de la máxima pendiente y la dirección de los surcos de labor a lo largo del campo (foto 5.10). La elección de las cuatro microcuencas caracterizadas se basó en estas diferencias en la dirección de la rugosidad orientada y la máxima pendiente. Se caracterizaron tres microcuencas con presencia de redes de regueros dendríticos (Pj-1, Pj-2 y Pj-3) y una microcuenca con desarrollo de una red de regueros confinados (Pj-4).



Foto 5.10: Las fotografía superior ofrece una perspectiva del campo agrícola de estudio de Paracuellos del Jarama con las redes de regueros dendríticas. En la fotografía se aprecia el cierre cóncavo de la ladera. En la foto inferior puede verse la continuación de la ladera hacia el lado izquierdo. En esta última fotografía se aprecia la diferente morfología de los regueros desarrollados.

En el caso de Ajalvir se caracterizaron dos campos agrícolas que, a su vez, son dos microcuencas hidrológicas debido al efecto barrera que ejercen las lindes existentes en los propios campos ante la entrada del agua de escorrentía (figura 5.24).

Para elaborar los modelos digitales del terreno se registraron las coordenadas absolutas de 2946 puntos sobre la ladera estudiada en Paracuellos del Jarama y de 1948 puntos en los campos estudiados en Ajalvir (1427 puntos sobre la ladera Aj-1 y 521 puntos sobre la ladera Aj-2) utilizando un GPS diferencial.

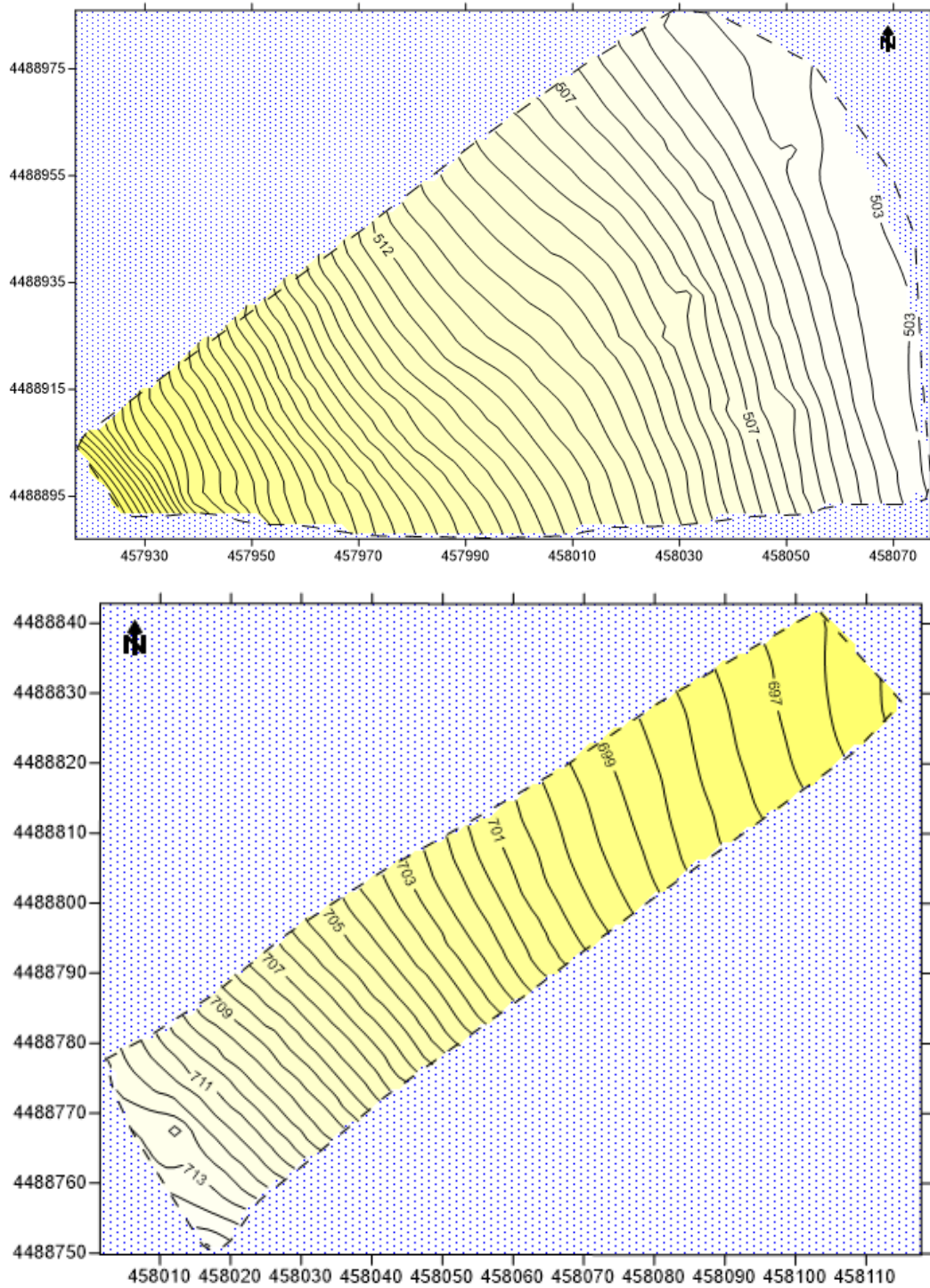


Figura 5.24: Mapas topográficos de Aj-1(arriba) y Aj-2 (abajo). La equidistancia entre las curvas de nivel es de 0.5 m. La escala del mapa se corresponde con las coordenadas UTM en m.

En el caso de Aj-1 la morfología de la red de regueros desarrollada es compleja. Mientras una parte de la red responde a los parámetros de las redes dendríticas de regueros, otra parte de la ladera presenta regueros confinados dentro de los surcos de la labranza (foto 5.11).



Foto 5.11: Visión parcial de Aj-1 desde la parte superior de la ladera.

En la fotografía se observan las dos morfologías de regueros presentes en el campo: mientras los regueros de la parte superior se van desarrollando hacia la izquierda y confluyendo entre ellos; en la parte inferior se observa que los regueros desarrollados son paralelos y se han confinado en los surcos de labor.

El caso de Aj-2 es más simple. Se trata de un plano inclinado, con forma aproximadamente rectangular y su lado mayor orientado a favor de la máxima pendiente. Esta geometría del campo de cultivo ha facilitado un laboreo próximo a la máxima pendiente, abajo-arriba, consecuencia de la cual el desarrollo de la red de regueros fue confinada en los surcos de labor (foto 5.12).



Foto 5.12: Aj-2. En la foto puede apreciarse el desarrollo de los regueros de forma paralela, confinados, aunque se produce alguna captura puntual entre ellos. La totalidad del campo de cultivo está delimitado por una linde con vegetación que impide la entrada de agua desde el exterior.

5.2.3.2. Caracterización de la precipitación desencadenante de la erosión del suelo

Los datos de precipitación fueron obtenidos de la estación meteorológica del aeropuerto de Barajas (Madrid) situada a escasos 5 kilómetros de la zona de estudio. La precipitación desencadenante de la erosión fue la del 21 de septiembre de 2008, día en el que se llegaron a acumular 58.9 mm en 24 horas (figura 5.25).

En la zona de estudio, para la serie de 50 años (1951-2015), la precipitación media anual es de 407.4 mm. Considerando dicho valor de precipitación anual media, la precipitación desencadenante de la erosión estudiada, 58.9 mm, supone en torno al 14% de la precipitación anual media, dentro de un año algo más húmedo que la media, con hasta 484.9 mm acumulados. La aplicación de la distribución de Gumbel para la precipitación máxima acumulada en 24 horas para cada mes aplicando el modelo CHAC (Calculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas) elaborado por el CEDEX para la serie temporal 1951-2011 ha ofrecido un valor para el periodo de retorno de 18.82 años (figura 5.26).

Considerando los 58.9 mm de precipitación en 24 horas en la zona de estudio el 21 de septiembre de 2008 se puede calificar el evento como extremo, pese a no superar los 60 mm que según el AEMET es necesario para considerar una lluvia como extrema. En este caso, el volumen de agua se situó en el umbral de los 60 mm, siendo la precipitación de carácter tormentoso y de corta duración según testimonios recogidos en la zona y en la prensa local.

Pluviograma (Barajas)

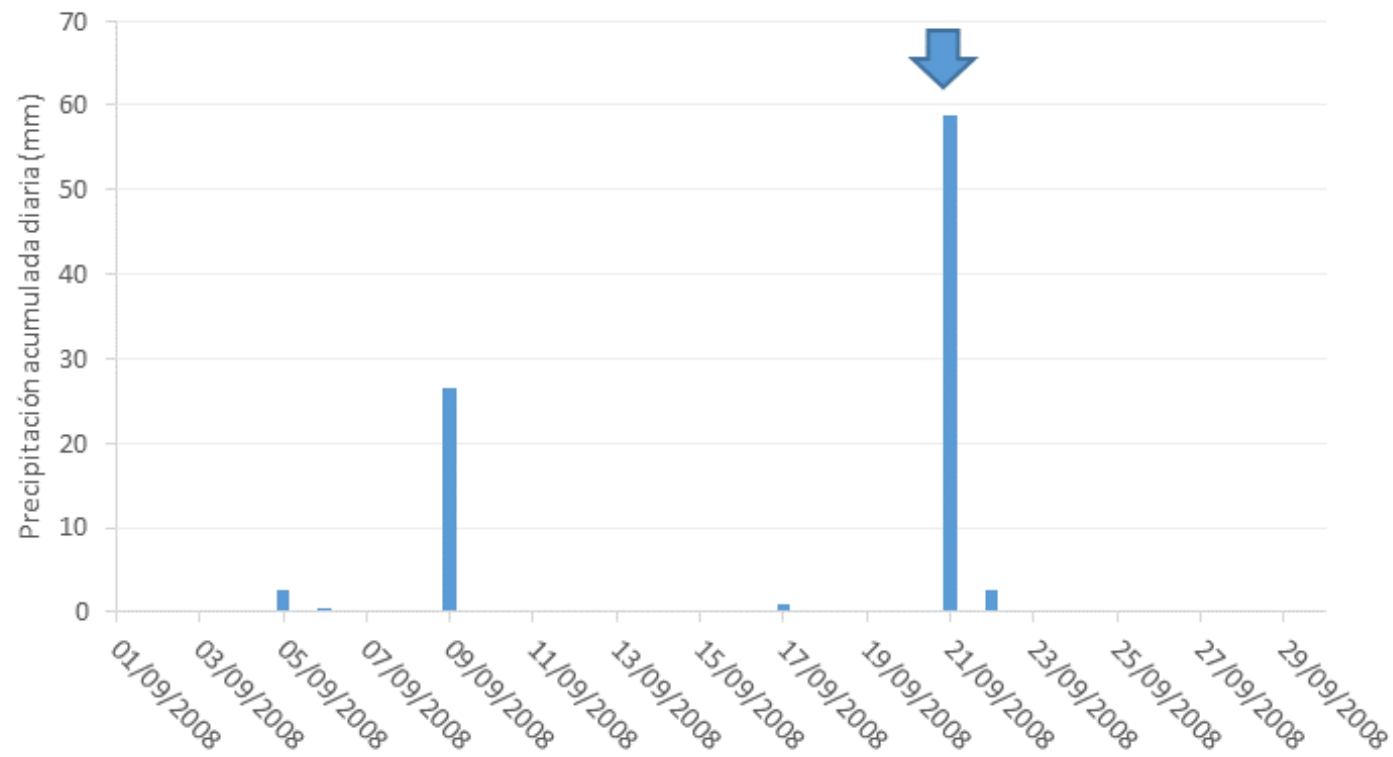
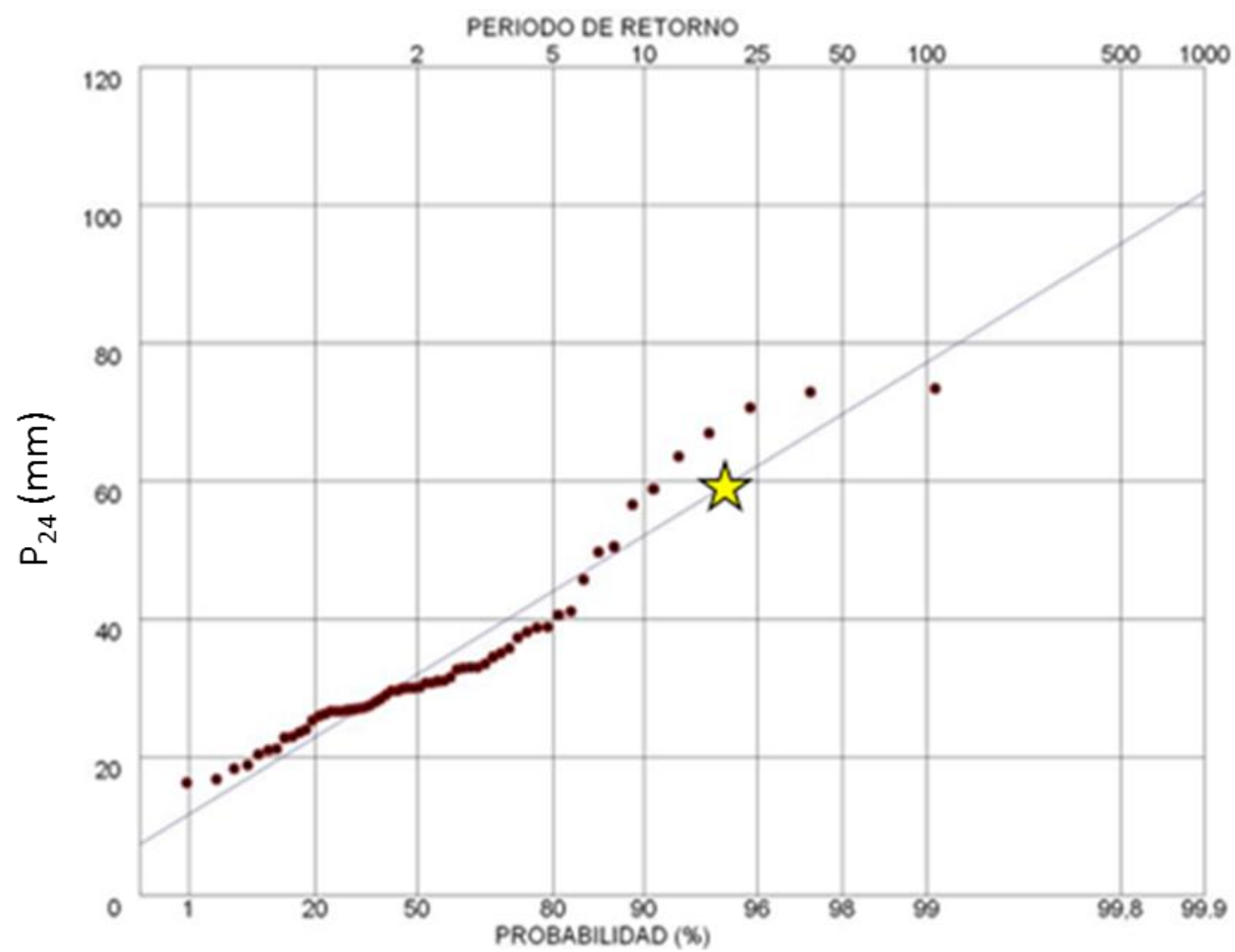


Figura 5.25: Pluviograma de precipitación acumulada en 24 horas para el periodo de estudio (septiembre 2008) en Barajas. La erosión se desencadenó a partir de la lluvia del día 21 de septiembre (FLECHA).



En la página anterior: Figura 5.26: Distribución de Gumbel para P24 (serie temporal 1951-2011) de la estación de Barajas. En el eje superior se indican los periodos de retorno para episodios con precipitaciones acumuladas en 24 h (P24) y en el eje inferior la probabilidad de que en un año dado no se produzca una precipitación superior a P24. La estrella indica el valor del punto correspondiente a la precipitación desencadenada del evento de erosión en Paracuellos del Jarama y Ajalvir.

5.2.3.3. Resultados

5.2.3.3.1. Paracuellos del Jarama

En las cuatro microcuencas de Paracuellos del Jarama, Pj-1 a Pj-4, se identificó una intensa reguerización con morfología dendrítica en Pj-1, Pj-2 y Pj-3 y desarrollo de regueros confinados en Pj-4 (foto 5.13).



Foto 5.13: Vista de Pj-4 (izquierda) donde se aprecian los regueros confinados en los surcos de labor y de Pj-3 (derecha), con desarrollo de regueros dendríticos.

La selección de las cuatro zonas de estudio se ha realizado en base a los diferentes ángulos formados entre la dirección de los surcos de labor en las mismas (rugosidad orientada) y la dirección de la máxima pendiente. La cartografía de la red de regueros permite visualizar la distribución espacial de las redes de regueros estudiadas a lo largo de las diferentes superficies delimitadas y las diferencias en sus desarrollos (figuras 5.27, 5.28, 5.29 y 5.30)

En el caso de Pj-1 (figura 5.27) puede observarse que en la parte más oriental de la microcuenca, la más próxima a Pj-4, la densidad de drenaje es inferior, incrementándose ésta hacia el extremo opuesto. El incremento de la densidad de drenaje se corresponde por tanto con el incremento del ángulo entre la dirección de la máxima pendiente y la dirección de los surcos de labor. El ángulo que forma la dirección principal de los regueros respecto a las curvas de nivel, de forma cualitativa, podría definirse como oblicuo. Cabe destacar, por último, que la aparición del primer reguero no se produce hasta más allá de los 28 m de la divisoria superior de aguas según el perfil longitudinal de la microcuenca (tabla 5.22).

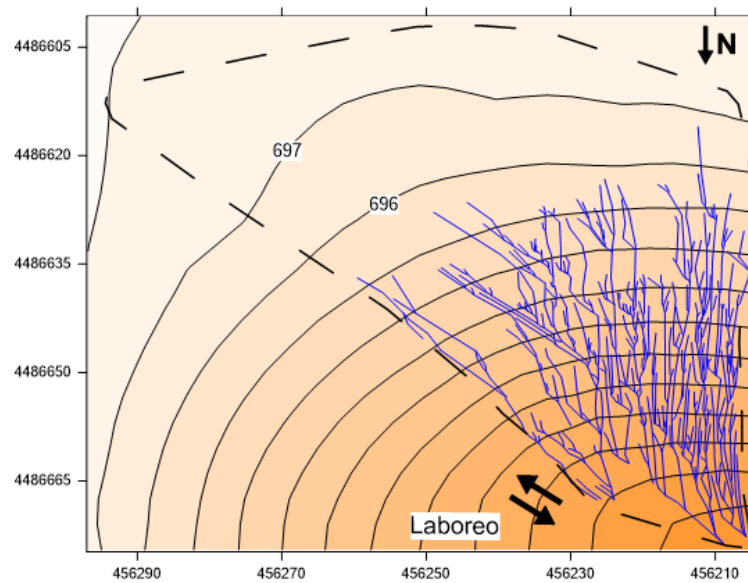
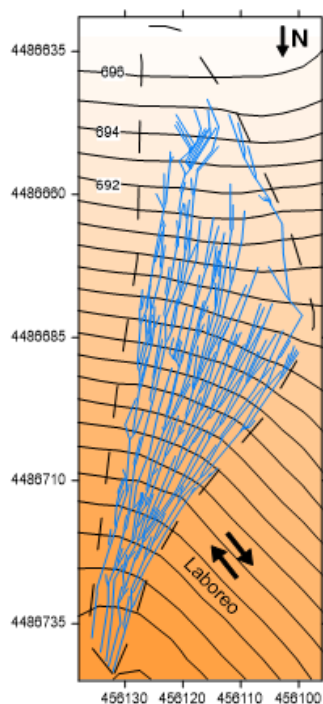


Figura 5.27: Mapa topográfico de Pj-1 con la posición de la red dendrítica de regueros desarrollada. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 1 m. La escala del mapa se corresponde con las coordenadas UTM en m.



En la cartografía de la red de regueros de Pj-2 (figura 5.28) cabe resaltar que el inicio de los regueros se produce mucho más próximo a la divisoria superior de aguas que en el caso anterior. En Pj-2 dicha distancia se sitúa en el entorno de los 12 m (tabla 5.22). Aparentemente, la densidad de drenaje es cualitativamente más alta que en el caso anterior. Al observar la figura 5.28 parece que el cinturón marginal de no erosión (Horton, 1945) fuese mucho menor, sin embargo, en la tabla 5.23 puede observarse que las densidades de drenaje de Pj-1 y Pj-2 son similares. En este caso, el ángulo que forma la dirección principal de los regueros respecto a las curvas de nivel puede definirse, nuevamente y de forma cualitativa, como oblicuo. Sin embargo, en este caso comparativamente con el anterior, se trataría de un ángulo mayor.

Figura 5.28: Mapa topográfico de Pj-2 con la posición de los regueros. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 2 m. La escala del mapa se corresponde con las coordenadas UTM en m.

Pj-2 se sitúa sobre una pequeña vaguada local, presentando un cambio en la dirección de las curvas de nivel, como se observa en la figura 5.28. La foto 5.14 muestra una panorámica de una parte de la ladera de Paracuellos del Jarama donde puede observarse la diferente morfología de los regueros en Pj-2 (parte izquierda de la fotografía) respecto al resto de la ladera de estudio. Lo más llamativo de Pj-2 es la existencia de algunos regueros con una sección comparativamente mayor que atraviesan la microcuenca prácticamente desde su cabecera. Este mayor tamaño de algunos regueros hace que la sección media de los regueros de Pj-2 sea superior al del resto de microcuencas de Paracuellos (tabla 5.23). Igualmente indica una mayor jerarquización de la red de regueros.

Foto 5.14: En una misma ladera se observan respuestas erosivas diferentes. En la parte izquierda de la imagen (Pj-2) se aprecia una mayor jerarquización de la red de regueros dendríticos, con canales de dimensiones mayores. En contraposición, en la parte derecha de la imagen (Pj-3), la red de regueros es más homogénea.



La microcuenca Pj-3 se encuentra situada sobre una superficie prácticamente plana. La cartografía de la red de regueros (figura 5.29) permite visualizar que en Pj-3 el ángulo que forma la dirección de máxima pendiente respecto a la dirección de los surcos de labor es prácticamente perpendicular. En estas circunstancias se ha desarrollado una red de regueros dendríticos cuya dirección principal es perpendicular a las curvas de nivel (foto 5.15). Cabe destacar además la alta densidad de la red de regueros, más de 1 metro de reguero por m² de superficie. A este hecho contribuye que el inicio de los regueros se haya producido muy cercano a la divisoria superior de aguas, apenas a 3.5 m, no existiendo prácticamente cinturón marginal de no erosión (tabla 5.23).

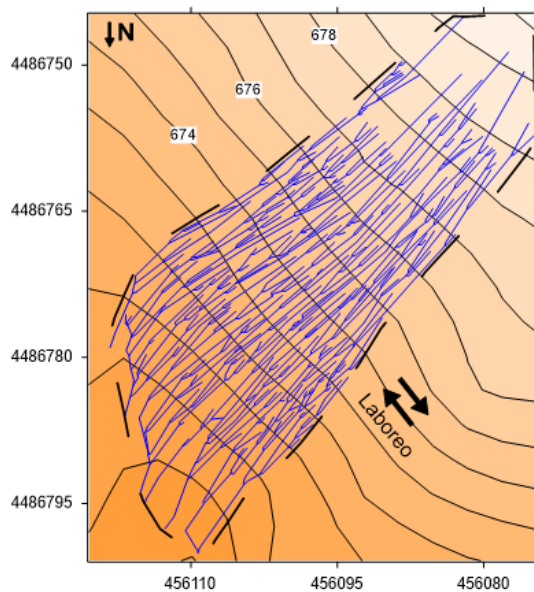


Figura 5.29 (izqda.): Mapa topográfico de Pj-3 con la posición de la red dendrítica de regueros. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 1 m. La escala del mapa se corresponde con las coordenadas UTM en m.

Foto 5.15 (drcha.): Detalle de la morfología de los regueros en la microcuenca Pj-3.

Por último, la microcuenca Pj-4 presenta un desarrollo de red de regueros confinados. Pj-4 es una superficie plana donde la dirección de los surcos de labor es paralela a la dirección de la máxima pendiente. La cartografía de la red de regueros permite visualizar que la mayoría de los regueros se inician a una distancia muy similar respecto a la divisoria superior de aguas y muy lejos de ésta (figura 5.30). La menor de estas distancias es de algo más de 53 m (tabla 5.23), si bien está relacionada con un cambio de pendiente. En este caso, la dirección de las curvas de nivel y la dirección predominante de los regueros tienen direcciones perpendiculares, al igual

que en Pj-3. Sin embargo, en este caso no se desarrolla una red dendrítica de regueros sino que se desarrollan regueros confinados en los surcos de labor.

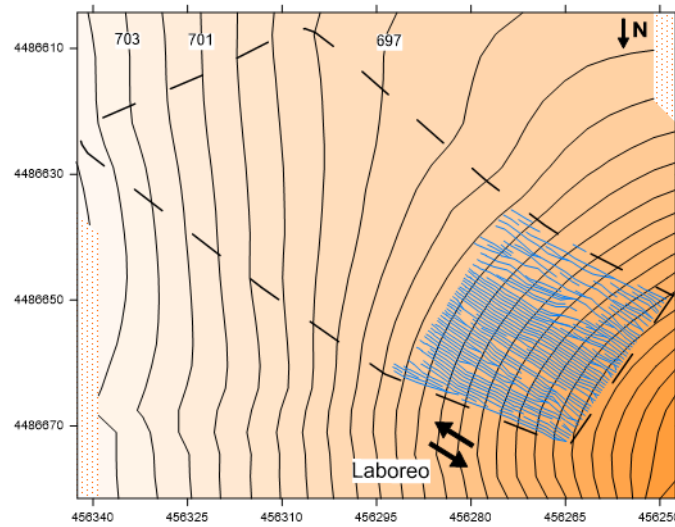


Figura 5.30: Mapa topográfico de Pj-4 con la posición de los regueros confinados. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 1 m. La escala del mapa se corresponde con las coordenadas UTM en m.

En la tabla 5.22 pueden observarse algunos valores topográficos relevantes para la caracterización de las cuatro superficies de estudio. De los resultados puede destacarse la similar pendiente media existente en Pj-1, Pj-2 y Pj-3, en torno al 20%, mientras que para Pj-4 dicho valor desciende hasta casi la mitad: 10.7%. En el caso de la aparición del primer reguero, las microcuencas con redes de regueros dendríticos presentan la mayor proximidad de la red de regueros a la divisoria superior de aguas, además parece que existe una tendencia, que habrá de explorarse, en la cual un mayor ángulo entre la máxima pendiente y la dirección de los surcos de labor produce una mayor cercanía de la incisión de los regueros a la divisoria superior de aguas. En el extremo opuesto se sitúa el caso Pj-4 que presenta, con diferencia el mayor cinturón marginal de no erosión (Horton, 1945).

Tabla 5.22: Características topográficas de las superficies de estudio.

	Área (m ²)	Pendiente media (%)	Pendiente máxima (%)	Longitud de la microcuenca (m)	Desnivel máximo (m)	Aparición primer reguero (m)
Pj-1	1017.76	18.6	28.5	63.56	11.8	28.22
Pj-2	2004.28	20.9	30.5	107.70	22.5	12.91
Pj-3	1182.96	20.8	30.9	62.97	13.1	3.49
Pj-4	2890.72	10.71	18.3	81.83	8.32	53.30

El resultado de la cubicación de la erosión llevada a cabo en estas cuatro microcuencas aparece en la tabla 5.23. Es en la microcuenca Pj-2 en la que se produce mayor pérdida de volumen de suelo por cárcavas y regueros, hasta 21.61 m³. Obteniendo las tasas de erosión respectivas de acuerdo a las superficies afectadas y considerando la erosión laminar estimada, se observa que todos los valores se sitúan por encima de los 100 Mg ha⁻¹, con un valor máximo de 181.9 Mg ha⁻¹, excepto en Pj-4. El caso de Pj-4 presenta una tasa de erosión notablemente inferior: 66.7 Mg ha⁻¹.

Tabla 5.23: Resumen de la erosión por regueros en las microcuencas de Paracuellos del Jarama.

Cuenca	Fecha	Evento de lluvia erosivo (mm)	Estado del suelo previo a la erosión. Dirección surcos labor	Cárcava y/o reguero										EL	ET	TEAE
				L (m)	Número de cabeceras	D.D. (m m ⁻²)	Sección			R.A.P.		Erosión				
							Media (m²)	c.v.	n	Media	c.v.	V (m³)	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	
Pj-1	21 de septiembre de 2008	58.9	Desnudo. Oblicuos a c.n.	809.60	152	0.795	0.0085	1.15	567	1.59	0.60	7.52	101.97	22.66	124.6	6.62
Pj-2	21 de septiembre de 2008	58.9	Desnudo. Oblicuos a c.n.	1597.26	156	0.797	0.0119	1.14	634	1.65	0.60	21.61	148.79	33.06	181.9	9.66
Pj-3	21 de septiembre de 2008	58.9	Desnudo. Perpendiculares a c.n.	1514.82	233	1.281	0.0067	2.62	927	1.14	0.59	9.49	110.71	24.60	135.3	7.19
Pj-4	21 de septiembre de 2008	58.9	Desnudo. Paralelos a m.p.	1274.96	153	0.441	0.017	0.96	683	2.41	0.77	11.44	54.61	12.14	66.7	3.55

Siendo: L: longitud; D.D.: densidad de drenaje; c.v.: coeficiente de variación; n: número de secciones medidas; R.A.P.: relación anchura-profundidad; V: volumen; c.n.: curvas de nivel; EL: Erosión laminar estimada; ET: erosión total; TEAE: Tasa de erosión anual equivalente (relación entre la tasa de erosión del evento y el periodo de retorno de la precipitación que la ha generado).

5.2.3.3.2. *Ajalvir campos 1 y 2 (Aj-1 y Aj-2)*

La microcuenca Aj-1 representa un modelo mixto en el desarrollo de los regueros, similar al ya observado en el caso de estudio de Arroyomolinos Ay2-7. Se define como morfología mixta porque se desarrollan modelos de erosión de regueros confinados y dendríticos sobre una misma microcuenca. En este caso existe una predominancia de las morfologías confinadas, especialmente en la mitad inferior de la ladera (foto 5.16).

El modelo mixto se debe a una combinación en el control sobre el desarrollo de los regueros entre la rugosidad orientada (dirección de los surcos de labranza) y la topografía de la ladera agrícola. En este caso, la dirección de los surcos de labranza fue la de la máxima pendiente. En estas circunstancias, en los casos estudiados hasta el momento, las morfologías de regueros que se desarrollan serían confinadas. Sin embargo, la presencia de una vaguada en mitad de la ladera, que la atraviesa en diagonal y hace de divisoria natural de aguas entre la parte superior e inferior de la ladera, prevalece, frente a la rugosidad orientada, como factor de control de las morfologías de regueros, produciendo morfologías de red dendríticas a media ladera. El resultado es que las cabeceras de los regueros, en la parte superior de la ladera, inciden en el interior de los surcos de labor, para que, aguas abajo, la vaguada existente produzca una ruptura en la línea natural de drenaje, haciendo que los regueros confinados confluyan dando lugar a dos grandes regueros que cruzan en diagonal la ladera. Aguas abajo de la vaguada, la escorrentía superficial vuelve a encajarse a favor de los surcos de labor. A este desarrollo se une la interconexión existente entre las dos morfologías de red definidas (foto 5.16 y figura 5.31).

En la foto 5.16 se observa como en la parte superior e inferior de la ladera el desarrollo es de regueros confinados, donde el agua ha podido fluir a favor de los surcos de labor, mientras que a media ladera la dirección de los surcos cambia y se observan las capturas entre regueros.



Foto 5.16: Vista de Aj-1 donde se aprecia la dirección de los surcos de labor que han sido profundizados por el flujo de agua produciendo la formación de canales confinados, fundamentalmente en la parte inferior de la ladera. En la parte superior se aprecia como las formas canaliformes van desarrollándose y captándose hacia la parte izquierda, aguas abajo, del campo de labor.

En la figura 5.31 llama la atención que en el borde derecho del campo los regueros son muy rectilíneos, lo que denota que se trata de regueros confinados, pese a no ser paralelos a la dirección predominante del resto de regueros confinados desarrollados sobre la ladera. Esto se debe a que, a la hora de los pases de laboreo, el tractor siguió una dirección a favor de la máxima pendiente en todo el campo, es decir, de arriba abajo, de tal manera, que para recuperar su

posición en la parte alta de la ladera ascendía por el lateral derecho de la misma, modificando en esta zona la dirección de los surcos de labor y, por ende, de los regueros confinados.

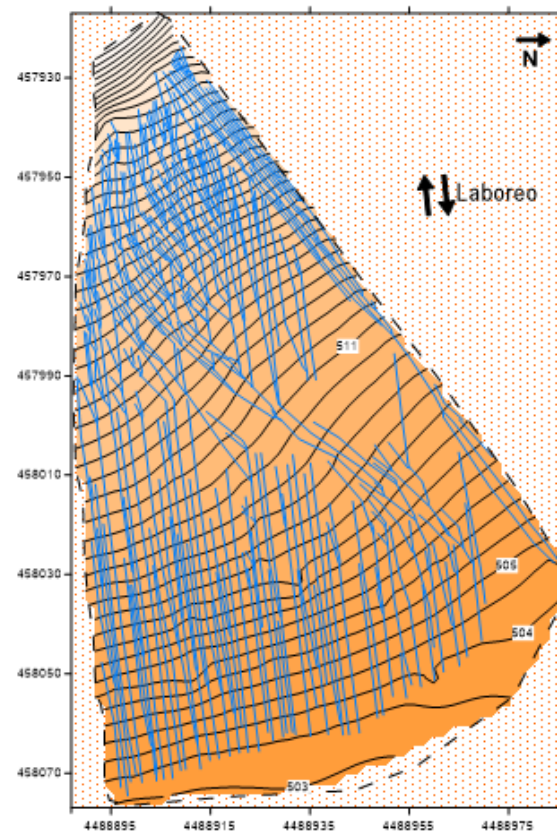


Figura 5.31: Mapa topográfico de Aj-1 con la posición de los regueros confinados. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 0.5 m. La escala del mapa se corresponde con las coordenadas UTM en m.

Los regueros que fluyen por el fondo de la pequeña vaguada capturando la mayoría de los regueros de la parte superior de la ladera presentan unas dimensiones muy superiores a las del resto de los regueros (foto 5.17).



Foto 5.17: Vista de Aj-1 donde se aprecia la diferente escala del canal principal de la red dendrítica, que cruza la ladera con sentido Suroeste-Noreste y va captando el agua de todos los regueros de la parte superior de la ladera, frente a los canales confinados de la parte inferior de la ladera, que apenas se intuyen.

El otro caso de estudio en Ajalvir, Aj-2, representa un modelo de erosión con formación únicamente de regueros confinados. Aj-2 presenta una geometría de plano inclinado en la cual

los surcos de labor de labranza se orientaron a favor de la máxima pendiente. La cartografía de la red de regueros, figura 5.32, permite observar que los regueros comienzan muy cerca de la divisoria superior de aguas, allí donde la pendiente es más pronunciada y concluyen en el tercio inferior de la ladera, según va disminuyendo la pendiente y, por tanto, el agua pierde energía y, con ello, poder erosivo. De hecho, esta parte inferior se encontraba llena de depósitos (foto 5.18).

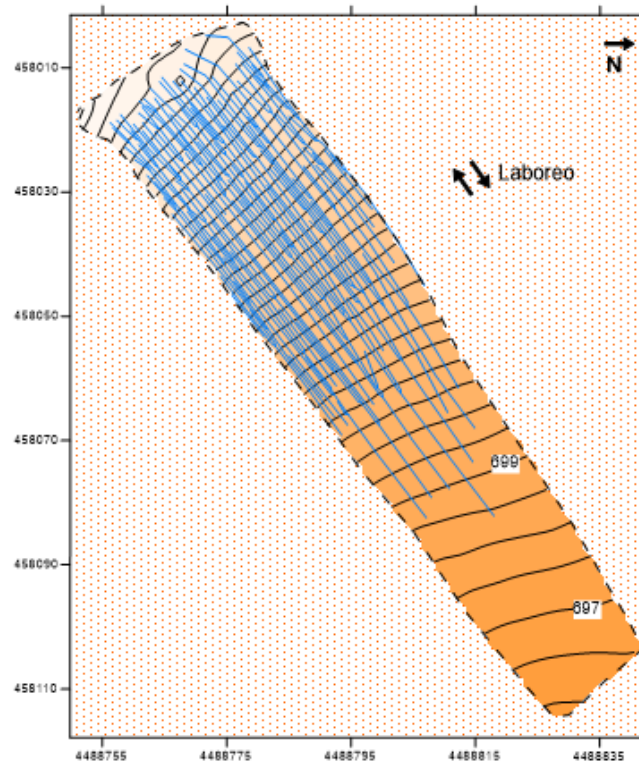


Figura 5.32: Mapa topográfico de Aj-2 con la posición de los regueros confinados. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 0.5 m. La escala del mapa se corresponde con las coordenadas UTM en m.

Llama la atención la importante densidad de regueros presente en la parte superior de la ladera. Este hecho hace que, pese a no haber regueros en la mitad inferior de la ladera, la densidad de drenaje sea superior a la de Aj-1: 0.675 m m^{-2} frente a 0.496 m m^{-2} eso sí, con una sección media inferior a Aj-1, 0.0038 frente a 0.0065 m^2 (tabla 5.25)

Que los regueros sean confinados no impide que se produzcan algunas capturas entre ellos, pero en estas morfologías suelen ser un número limitado. Este hecho puede verse fácilmente en la foto 5.18 y, probablemente, se producen en aquellos lugares en que los caballones presentan debilidades.



Foto 5.18: Vista de Aj-2 donde se aprecia el cambio de pendiente que se produce en la parte inferior y los depósitos asociados al mismo (en blanquecino en la foto). También pueden verse algunas capturas entre los regueros más importantes, aunque mayoritariamente presentaban una morfología rectilínea y paralela entre ellos.

En la tabla 5.24 pueden observarse algunos valores topográficos relevantes para la caracterización de las superficies erosionadas en Aj-1 y Aj-2.

Tabla 5.24: Características topográficas de las superficies de estudio.

	Área (m ²)	Pendiente media (%)	Pendiente máxima (%)	Longitud de la microcuenca (m)	Desnivel máximo (m)	Aparición primer reguero (m)
Aj-1	11006.76	15.35	39.59	169.26	25.1	9.60
Aj-2	3057.92	11.89	30.93	124.48	14.8	4.58

Cabe destacar, de los valores topográficos, la pendiente media existente en ambas laderas. En el caso de Aj-2 ya se ha citado el cambio de pendiente en la parte inferior de la cuenca, que disminuye el valor medio de la pendiente. Si se considerase solo la parte superior de la ladera (hasta donde terminan los regueros) el valor de la pendiente media sería algo mayor: 13.65%. También resulta destacable la cercanía a la que se produce la incisión de los primeros regueros, también producida por la elevada pendiente en este lugar.

El evento erosivo se produjo en ambos casos sobre un campo agrícola desnudo, sin ningún grado de cobertura vegetal.

Tabla 5.25: Resumen de la erosión por regueros en las microcuencas de Aj-1 y Aj-2.

Cuenca	Fecha	Evento de lluvia erosivo (mm)	Estado del suelo previo a la erosión. Dirección surcos labor	Cárcava y/o reguero										EL	ET	TEAE
				L (m)	Número de cabeceras	D.D. (m m ⁻²)	Sección			R.A.P.		Erosión				
							Media (m ²)	c.v.	n	Media	c.v.	V (m ³)	Mg ha ⁻¹			
Aj-1	21 de septiembre de 2008	58.9	Desnudo. Paralelo a m.p.	5461.87	282	0.496	0.0065	1.14	1506	1.63	0.69	40.74	50.45	11.21	61.7	3.28
Aj-2	21 de septiembre de 2008	58.9	Desnudo. Paralelo a m.p.	2065.26	100	0.675	0.0038	0.73	521	1.30	0.57	9.68	43.15	9.59	52.7	2.80

Siendo: L: longitud; D.D.: densidad de drenaje; c.v.: coeficiente de variación; n: número de secciones medidas; R.A.P.: relación anchura-profundidad; V: volumen; c.n.: curvas de nivel; EL: Erosión laminar estimada; ET: erosión total; TEAE: Tasa de erosión anual equivalente (relación entre la tasa de erosión del evento y el periodo de retorno de la precipitación que la ha generado).

Junto a los diferentes valores tanto topográficos como de las características de los regueros observados hasta el momento, es destacable la elevada densidad de drenaje existente en ambas laderas, cercana a 0.5 m de canal por m² de superficie en el caso de Aj-1, e incluso superior en el caso de Aj-2. Estos valores tan altos de densidad de drenaje se compensan con las secciones medias, lo cual hace que los valores de pérdida de suelo no sean especialmente altos.

La tasa de erosión total del evento erosivo fue de 61.7 Mg ha⁻¹ para Aj-1 y 52.7 Mg ha⁻¹ para Aj-2, con lo que considerando el periodo de retorno de la precipitación desencadenante de la erosión, 18.82 años, sitúa la tasa de erosión anual equivalente en 3.28 y 2.8 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para Aj-1 y Aj-2, respectivamente (tabla 5.25).

5.2.4. Episodios erosivos en Móstoles, Comunidad de Madrid

5.2.4.1. Descripción del área de estudio

5.2.4.1.1. Marco fisiográfico

El municipio de Móstoles se sitúa a unos 20 km al Suroeste de la ciudad de Madrid y cuenta con una población por encima de los 200000 habitantes, lo que la sitúa como el segundo núcleo en población de la Comunidad de Madrid (figura 5.33). Pese a que se trata de una ciudad que basa su economía en los sectores industriales, tecnológicos y de servicios, más de un 40% de su superficie está dedicada a tierras agrícolas. De las 4536 ha del término municipal, pertenecientes a la Comarca Agraria Suroccidental dentro de la Comunidad de Madrid, hasta 1837.88 ha están dedicadas a la agricultura. Del total de tierras cultivadas, casi el 92% lo son de cultivos herbáceos, en total 1684.91 ha. El 8% restante se divide entre cultivos leñosos, pequeños huertos familiares, tierras para pastos permanentes y otras tierras (Censo Agrario del Instituto Nacional de Estadística, 2009).



Figura 5.33: En la figura puede observarse la situación de Móstoles dentro de la Comunidad de Madrid. Modificado de <https://wikipedia.org>

El término municipal de Móstoles es adyacente al de Arroyomolinos, anteriormente descrito en este capítulo. Ambos se encuentran parcialmente incluidos en el Parque Regional del curso

medio del río Guadarrama y su entorno. La zona de estudio está compuesta por colinas, relieves suavemente alomados con pendientes moderadas, en su mayoría entre un 5 y un 15%, y que solo presenta áreas mayoritariamente llanas en las vegas de los arroyos.

Dentro del término municipal de Móstoles se han estudiado dos campos agrícolas con rasgos de erosión. Cada uno de los campos agrícolas sufrió un evento de erosión asociado a una precipitación distinta, aunque aquí se presentan juntos al situarse ambos campos dentro del mismo término municipal.

El primero de los campos agrícolas estudiados, que se ha denominado como Móstoles 1, Mo-1, presentó rasgos erosivos tras la precipitación producida entre los días 15 y 16 de febrero de 2010. En el mismo se individualizaron y cartografiaron tres microcuencas hidrológicas: Mo1-1, Mo1-2 y Mo1-3. Las dos primeras presentaban rasgos erosivos por flujos concentrados, mientras que la tercera, Mo1-3, no presentaba rasgos de erosión. Esta última se estudió a los efectos de poder indagar en los factores limitantes para el desencadenamiento del proceso erosivo.

El segundo de los campos estudiados en Móstoles, denominado como Móstoles 2, Mo-2, presentó rasgos erosivos tras la precipitación producida entre los días 20 y 22 de diciembre de 2010. En este caso, el campo agrícola conformó una única unidad hidrológica.

Ambos campos agrícolas se encuentran situados en la parte suroccidental del término municipal de Móstoles, próximos al límite con Arroyomolinos (figura 5.34). La ladera Mo-2 está junto a la carretera A-5 y es visible desde esta, mientras que el caso de Mo-1 presentó un acceso más complicado.

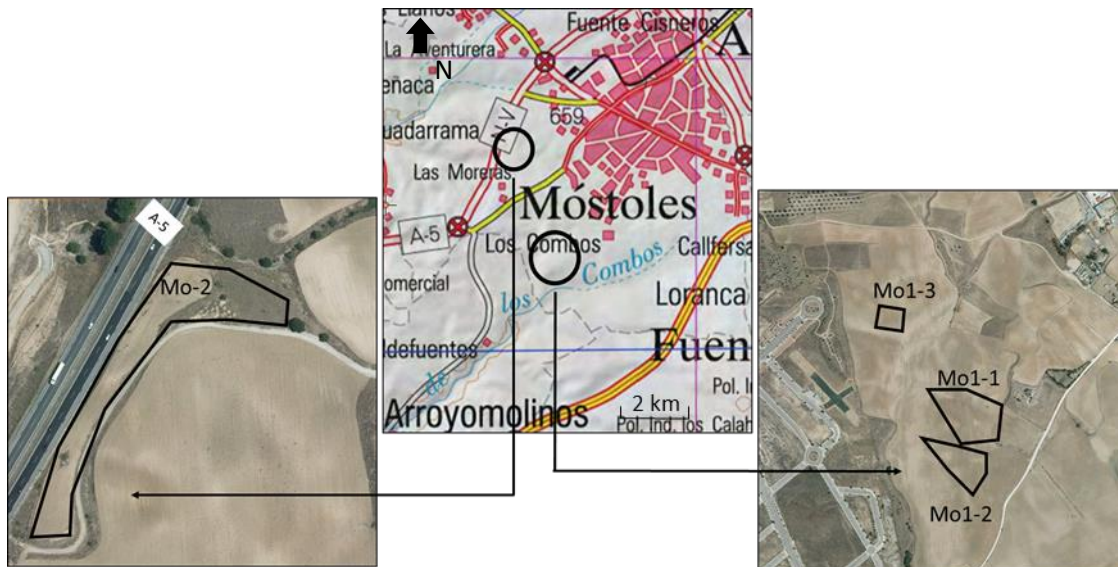


Figura 5.34: Situación de los dos campos agrícolas de estudio Mo-1 y Mo-2. Mo-1-1 se sitúa a $40^{\circ} 17' 55.78''$ N de latitud y $3^{\circ} 53' 21.09''$ W de longitud, Mo-2 se sitúa a $40^{\circ} 18' 39.76''$ N de latitud y $3^{\circ} 54' 2.78''$ W de longitud. Fuente: Visor SIG-PAC. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente (MAGRAMA).

La microcuenca de estudio Mo1-1 presentó una superficie total de 9034.94 m^2 , Mo1-2, 16304.68 m^2 , mientras en el caso de Mo1-3 la superficie fue de 5064.93 m^2 . En Mo-2 la superficie estudiada abarcó un total de 6562.87 m^2 .

5.2.4.1.2. *Edafología y usos del suelo*

Tanto tectónica como sedimentológicamente, el área de estudio es, en rasgos generales, equivalente al descrito anteriormente para Arroyomolinos. Debido a la cercanía de estos dos campos agrícolas, Mo-1 y Mo-2, con los anteriormente estudiados en Arroyomolinos, Ay-1 y Ay-2, para la caracterización del suelo se consideró el perfil edáfico descrito en Arroyomolinos (ver apartado 5.2.1.1.2.). A esta información se añadió la toma de cuatro muestras de superficie (primeros 20 cm) en cada una de las cuatro microcuencas estudiadas en Móstoles. De estas muestras se han obtenido las principales propiedades físico-químicas de estos suelos (tablas 5.26 y 5.27).

Los resultados del análisis del horizonte superficial del suelo presentaron, en este caso, un contenido en materia orgánica similar a los de Arroyomolinos: 0.6% de valor medio en Móstoles frente a 0.75% en Arroyomolinos. En todo caso, se trata de contenidos en materia orgánica muy bajos. Cabe destacar que la textura del suelo fue franco arenosa para tres de las cuatro muestras analizadas. En el cuarto caso, Mo1-2, el contenido en arcilla fue algo mayor y la textura fue franco arcillo-arenosa.

Las mediciones de densidad aparente, mediante el método del cilindro, ofrecen valores muy similares para las tres microcuencas estudiadas en Móstoles 1: 1.36, 1.33 y 1.29 g cm⁻³ para Mo1-1, Mo1-2 y Mo1-3, respectivamente (tabla 5.26). Textualmente no existen diferencias reseñables entre las tres muestras, por lo que el suelo puede considerarse homogéneo en superficie. Por lo tanto, el desarrollo de regueros en Mo1-1 y Mo1-2 y el no desarrollo de los mismos en Mo1-3 no se debe a una diferencia en las propiedades físico-químicas del suelo. Para el cálculo de la tasa de erosión se utilizó el valor medio de densidad aparente del suelo: 1.326 g cm⁻³.

En el caso de Mo-2 la textura del suelo fue la misma que en el caso de Mo-1, franco arenosa. La densidad aparente del suelo de este campo de cultivo fue de 1.41 g cm⁻³.

El cultivo habitual en los dos campos agrícolas estudiados es herbáceo, cereal, que suele sembrarse entre octubre y noviembre en función de las precipitaciones estacionales. En este caso, ambos campos estaban en barbecho, suelo desnudo. En el caso de Mo-1, precipitación en febrero de 2010, el campo estaba en barbecho y había crecido cierta vegetación silvestre dada la época del año de la precipitación. El último pase de laboreo, antes del barbecho, probablemente se había producido en otoño y había sido de vertedera. En el caso de Mo-2, el suelo estaba totalmente desnudo en el momento de la precipitación, diciembre de 2010, y el último pase de labor había sido de cultivador.

Tabla 5.26: Propiedades físicas de los suelos muestreados en las laderas estudiadas en Móstoles. Los datos se refieren al horizonte superficial (20 cm). a: arena (2-0.05 mm); l: limo (0.05-0.002 mm); arc: arcilla (< 0.002 mm). ρ_a : densidad aparente.

Campo	Punto de muestreo	a (%)	l (%)	Arc (%)	Textura (USDA)	ρ_a (gr cm ³)
Mo1-1	A media ladera	75.67	6.34	17.99	Franco arenosa	1.36
Mo1-2	A media ladera	69.47	7.38	23.15	Franco arcillo-arenosa	1.33
Mo1-3	A media ladera	76.64	5.59	17.78	Franco arenosa	1.29
Mo-2	A media ladera	76.71	7.60	15.70	Franco arenosa	1.41

Tabla 5.27: Propiedades químicas de los suelos muestreados en las laderas de Móstoles. Los datos se refieren al horizonte superficial (20 cm). Solo se han analizado los cationes de cambio en una de las muestras para cada una de las laderas. MO: materia orgánica. CE: conductividad eléctrica. CIC: Capacidad de intercambio catiónico. RAS: Relación de adsorción de sodio.

Campo	Punto de muestreo	MO (%)	pH	CE (dS/m)
Mo1-1	A media ladera	0.62	6.13	0.128
Mo1-2	A media ladera	0.82	7.91	0.169
Mo1-3	A media ladera	0.52	5.83	0.114
Mo-2	A media ladera	0.44	7.89	0.113

Campo	Ca ²⁺ (cmol/Kg)	Mg ²⁺ (cmol/Kg)	Na ⁺ (cmol/Kg)	K ⁺ (cmol/Kg)	CIC (cmol/Kg)	RAS
Mo1-3	4.79	0.97	0.13	0.37	10.36	0.08

5.2.4.1.3. Caracterización de las laderas de estudio

Mo1-1 y Mo1-2 tienen una morfología cóncava con cierre semicircular en la cabecera y una vaguada muy marcada (foto 5.19) (figura 5.35). En ambas microcuencas se ha desarrollado una pequeña red de regueros dendríticos en el fondo de las vaguadas existentes. En esta ladera los surcos de labor se orientaron próximos a la perpendicularidad respecto a la máxima pendiente.



Foto 5.19: Visión parcial del campo de cultivo Mo-1. En la fotografía se observan las 2 zonas de depósitos de los regueros desarrollados en ambas microcuencas y la forma cóncava de ambas. Mo1-1 (derecha) de Mo1-2 (izquierda).

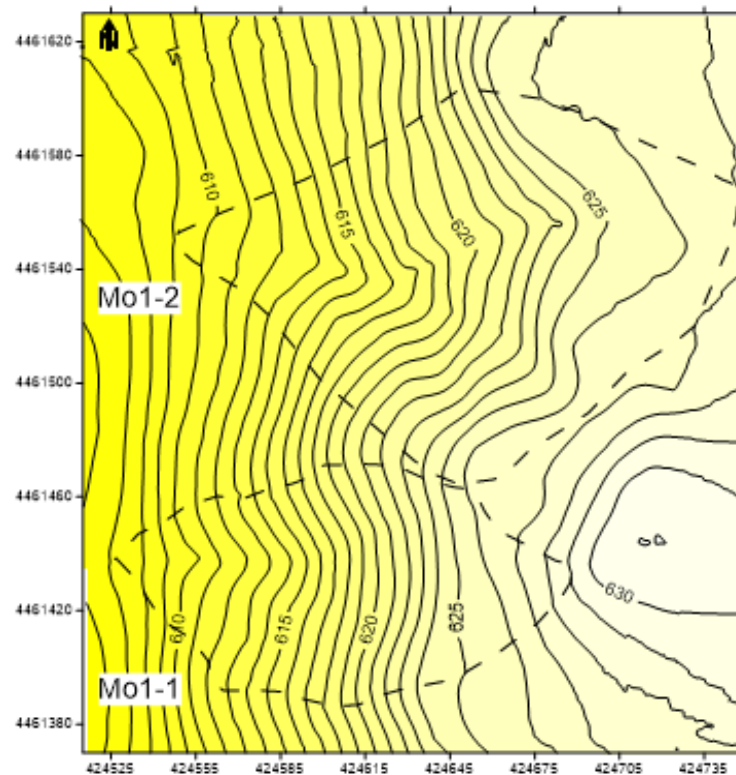


Figura 5.35: Mapa, parcial, de curvas de nivel de Móstoles 1 donde puede observarse la división de las 2 microcuencas hidrológicas (en línea discontinua), Mo1-1 y Mo1-2. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 1 m. La escala del mapa se corresponde con las coordenadas UTM en m.

El caso de Mo1-3 se trata, geométricamente, de un plano inclinado sin desarrollo de regueros (foto 5.20) (figura 5.36). En este caso, debido a su posición sobre la ladera y la continuidad en la dirección de los surcos de labor a lo largo de toda la ladera, en esta microcuenca la orientación de los surcos de labor fue a favor de la máxima pendiente.



Foto 5.20: Visión parcial del campo de cultivo Mo-1. En la fotografía izquierda se puede apreciar la ladera donde se ha caracterizado la microcuenca Mo1-3. Se trata de un plano inclinado y las formas que pueden apreciarse en la lejanía son las de los surcos de labor, que están realizados a favor de la máxima pendiente. Al observar con detalle la ladera, fotografía derecha, se comprueba que no hay desarrollo de regueros.

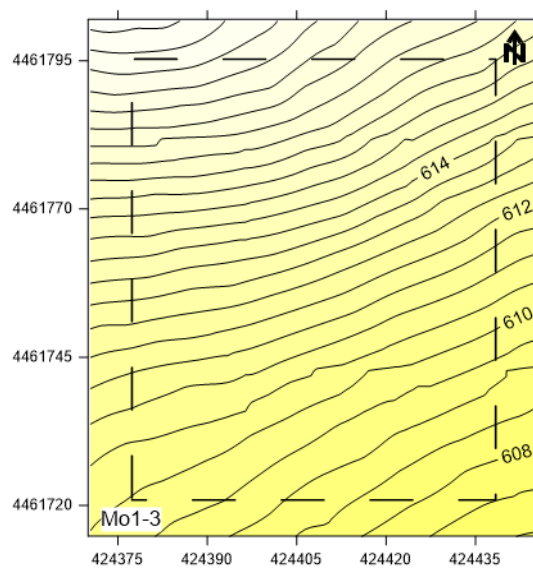


Figura 5.36: Mapa de curvas de nivel de Mo1-3. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 0.5 m. La escala del mapa se corresponde con las coordenadas UTM en m.

En el caso de Móstoles 2 los límites del campo de cultivo coinciden con los límites de la cuenca hidrológica. La misma presenta una cierta concavidad en el fondo, una ligera vaguada, especialmente marcada aguas abajo, cerca del punto de desagüe (figura 5.37).

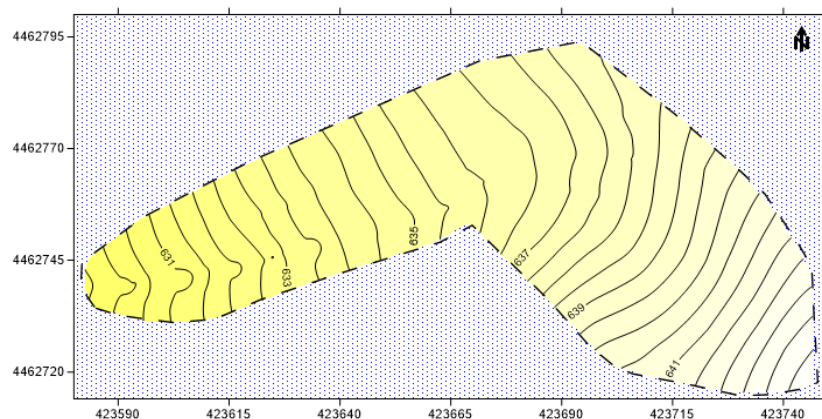


Figura 5.37: Mapa de curvas de nivel de Móstoles 2. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 0.5 m. La escala del mapa se corresponde con las coordenadas UTM en m.

Para elaborar los modelos digitales del terreno se registraron las coordenadas absolutas de 1907 puntos sobre las laderas estudiadas en Mo-1 y de 922 puntos en Mo-2, utilizando un GPS diferencial.

5.2.4.2. Caracterización de las precipitaciones desencadenantes de la erosión del suelo

Los datos de precipitación fueron obtenidos de la estación meteorológica de Cuatro Vientos (Madrid) situada a unos 10 kilómetros de la zona de estudio.

5.2.4.2.1. Evento de precipitación desencadenante de la erosión en Móstones 1: Febrero de 2010

La precipitación desencadenante de la erosión en Móstones 1 fue la de los días 15 y 16 de febrero de 2010, días en los que se llegaron a acumular 44.6 mm en 48 horas, 20.3 y 24.3 mm, respectivamente. Cabe destacar que en los días anteriores no se habían producido prácticamente precipitaciones, al igual que durante el mes de enero. Por lo cual, el evento erosivo se produce por la precipitación concreta de estos dos días (figura 5.38).

En la zona de estudio, para la serie de 38 años (1977-2015), la precipitación media anual es de 423.5 mm. Considerando dicho valor de precipitación anual media, la precipitación desencadenante de la erosión estudiada, 44.6 mm, supone en torno al 10% de la precipitación anual media. El año meteorológico 2009-2010 fue bastante más seco que la media de la serie de 38 años, presentando una precipitación anual de 304.81 mm. La aplicación de la distribución de Gumbel para la precipitación máxima en 48 horas aplicando el modelo CHAC (Calculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas) elaborado por el CEDEX para la serie temporal 1945-2011 ha ofrecido un valor para el periodo de retorno de 2.15 años (figura 5.39).

Con los valores analizados, puede concluirse que se trata de una precipitación nada excepcional, así lo indica su periodo de retorno, en el que el elemento relevante no es tanto la intensidad de la lluvia como su duración. Se trata de una precipitación de baja intensidad, larga duración y cierta frecuencia, que satura el suelo hasta reducir considerablemente el coeficiente de infiltración y provocar que la mayor parte del agua fluya en superficie.

5.2.4.2.2. Evento de precipitación desencadenante de la erosión en Móstones 2: Diciembre de 2010

La precipitación desencadenante de la erosión en Móstones 2 fue la de los días 20, 21 y 22 de diciembre de 2010, días en los que se llegaron a acumular 43.9 mm en 72 horas, 16.8, 13.8 y 13.3 mm, respectivamente. Cabe destacar que del 5 al 8 de diciembre se había producido otro pequeño temporal, llegando a acumular 39.5 mm de precipitación en 96 horas, sin consecuencias erosivas sobre la ladera de estudio. Esta precipitación antecedente aportó una humedad previa en el suelo que provocó una más rápida saturación del mismo para el caso del evento de precipitación estudiado (figura 5.40).

Considerando el valor de la serie histórica de 38 años, 423.5 mm, la precipitación desencadenante de la erosión estudiada, 44.6 mm, supone, nuevamente, en torno al 10% de la precipitación anual media. El año meteorológico 2010-2011 fue bastante más húmedo que la media de la serie de 38 años, presentando una precipitación anual de 557.3 mm. La aplicación de la distribución de Gumbel para la precipitación máxima en 72 horas aplicando el modelo CHAC (Calculo Hidrometeorológico de Aportaciones y Crecidas) elaborado por el CEDEX para la serie temporal 1945-2011 ha ofrecido un valor para el periodo de retorno de 2.37 años (figura 5.41). Las características de la precipitación son muy similares al caso de Móstones 1.

Pluviograma (Cuatro Vientos)

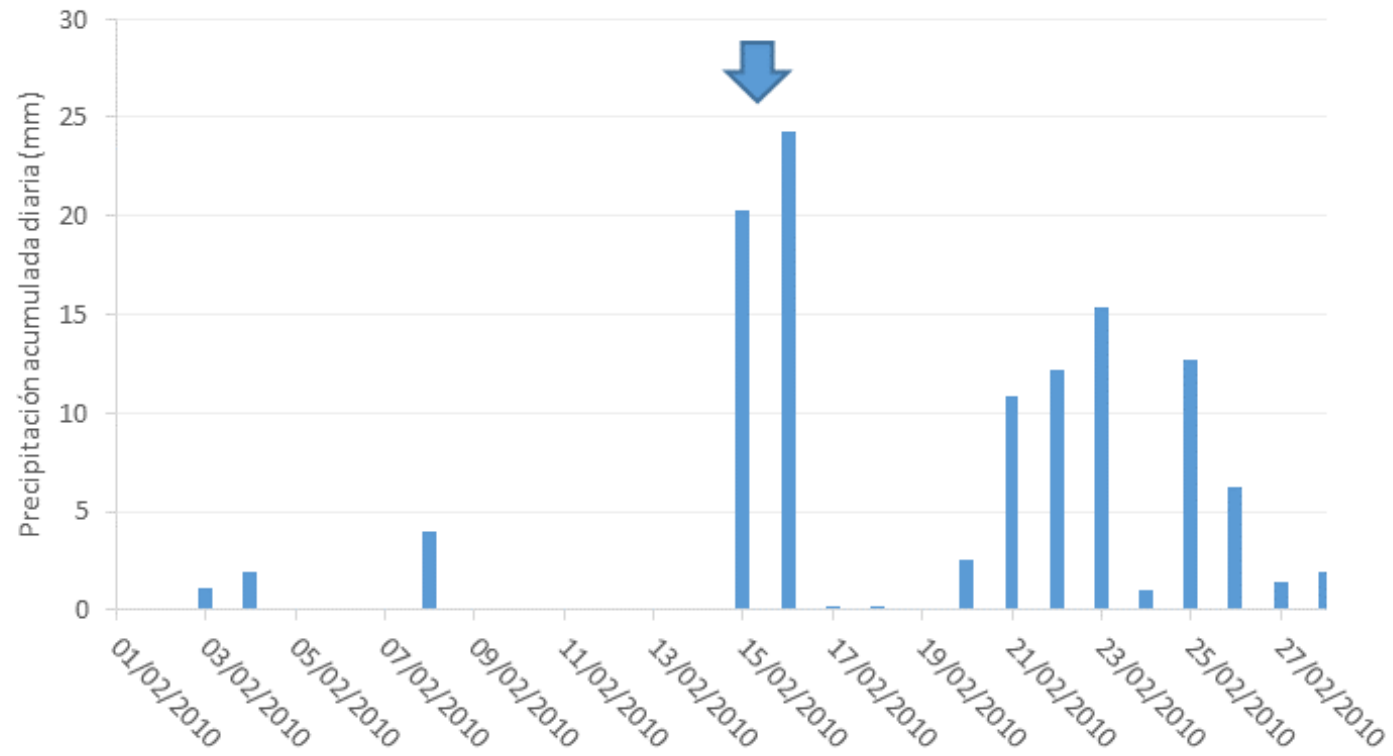


Figura 5.38: Pluviograma de precipitación acumulada en 24 horas para el periodo de estudio (febrero de 2010) en Cuatro Vientos. La erosión se desencadenó a partir de la lluvia de los días 15 y 16 de febrero (FLECHA).

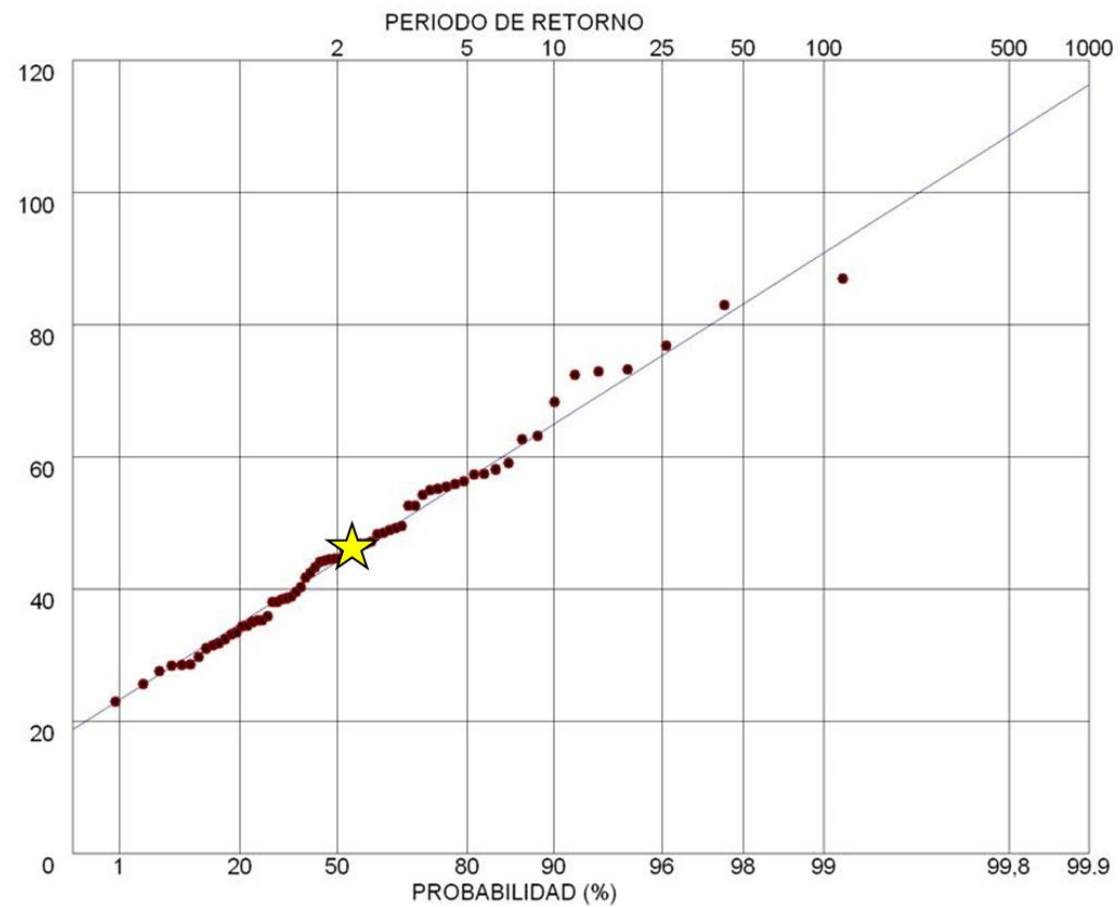


Figura 5.39: Distribución de Gumbel para P48 (serie temporal 1945-2011) de la estación de Cuatro Vientos. En el eje superior se indican los periodos de retorno para episodios con precipitaciones acumuladas en 48 h (P48) y en el eje inferior la probabilidad de que en un año dado no se produzca una precipitación superior a P48. La estrella indica el valor del punto correspondiente a la precipitación desencadenante del evento de erosión en Móstoles.

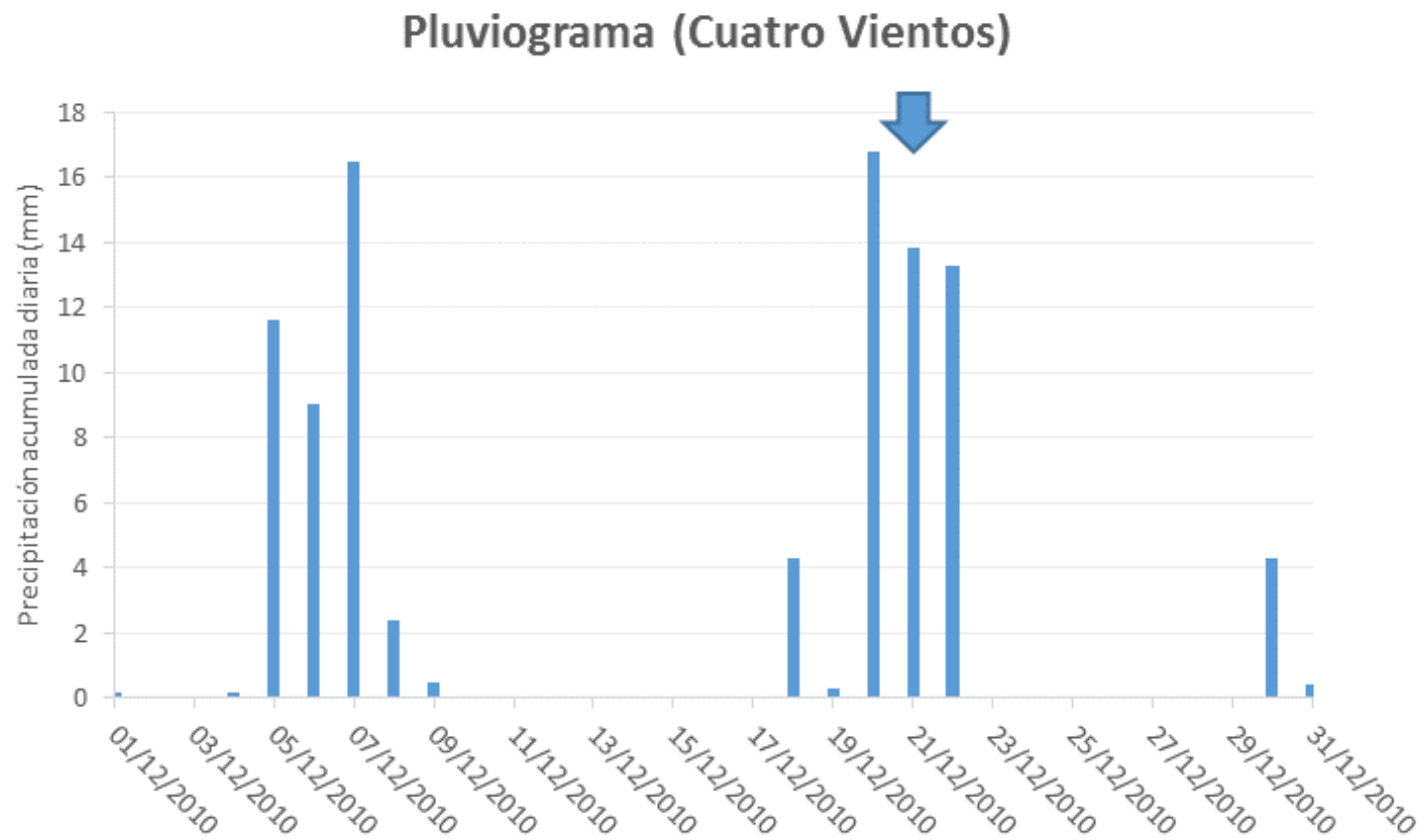
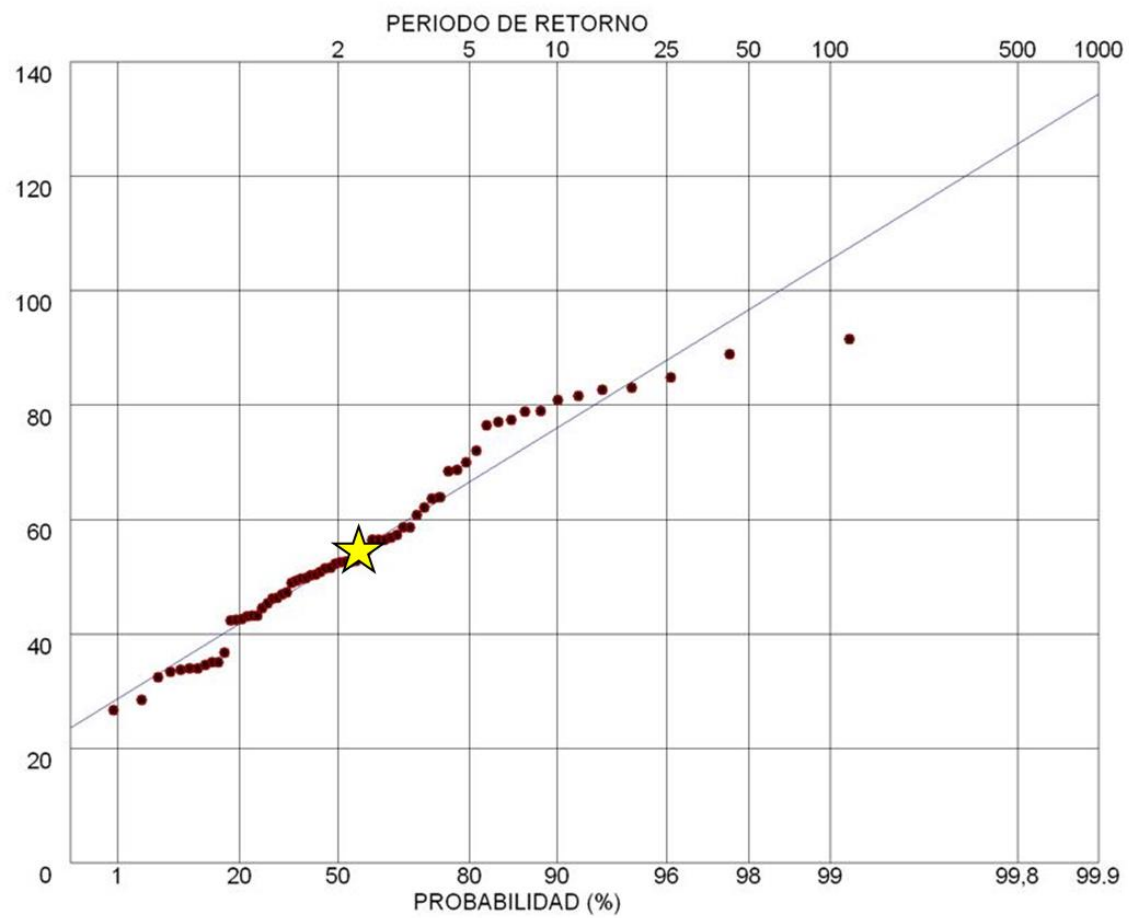


Figura 5.40: Pluviograma de precipitación acumulada en 24 horas para el periodo de estudio (diciembre de 2010) en Cuatro Vientos. La erosión se desencadenó a partir de la lluvia de los días 20, 21 y 22 de diciembre (FLECHA).



Página anterior: Figura 5.41: Distribución de Gumbel para P72 (serie temporal 1945-2011) de la estación de Cuatro Vientos. En el eje superior se indican los periodos de retorno para episodios con precipitaciones acumuladas en 72 h (P72) y en el eje inferior la probabilidad de que en un año dado no se produzca una precipitación superior a P72. La estrella indica el valor del punto correspondiente a la precipitación desencadenante del evento de erosión en Móstoles.

5.2.4.3. Resultados

5.2.4.3.1. Móstoles campo 1 (Mo-1)

En Mo1-1 y Mo1-2 se identificó el desarrollo de redes de regueros con morfología en planta dendrítica. Se trata de dos redes de regueros de escaso desarrollo que se circunscriben fundamentalmente al fondo de las vaguadas existentes (foto 5.21).



Foto 5.21: Reguero desarrollado en el fondo de vaguada de Mo1-2.

Morfológicamente, ambas microcuencas cartografiadas presentan una forma cóncava con cierre semicircular en la parte superior y una vaguada muy bien definida (figura 5.35). Diferente es el caso de Mo1-3 que, sin desarrollo de regueros, presenta una geometría de plano inclinado.

Mo1-1 abarca un total de 0.9 ha con una pendiente media del 14.32%, mientras Mo1-2 abarca hasta 1.6 ha aunque presenta una pendiente media inferior, 8.91%. El caso de Mo1-3 representa una muestra de la ladera de estudio sin regueros, por ello, su superficie no es relevante, mientras que si puede ser un dato de interés su pendiente media, el 11.56%.

Otro valor topográfico que puede resultar interesante es la longitud de las microcuencas, medidas a lo largo de los perfiles longitudinales de las mismas. Las microcuencas con desarrollo de regueros presentan aproximadamente el doble de longitud que Mo1-3, 161.98, 194.26 y 84.76 m para los casos de Mo1-1, Mo1-2 y Mo1-3, respectivamente. Sin embargo, las apariciones de los primeros regueros tanto en Mo1-1 como en Mo1-2 requirieron menores longitudes que la longitud total de Mo1-3. En el caso de Mo1-1 las condiciones necesarias para la incisión del primer canal (superación del esfuerzo cortante critico) se produjo a 67.58 m, mientras en Mo2-2 lo hizo a apenas 18.79 m. En el caso de Mo1-3, no se produjeron estas condiciones críticas en la totalidad de la longitud de la ladera, 84.76 m.

En la tabla 5.28 pueden observarse algunos valores topográficos relevantes para la caracterización de las superficies de estudio.

Tabla 5.28: Características topográficas de las superficies de estudio.

	Área (m ²)	Pendiente media (%)	Pendiente máxima (%)	Longitud de la microcuenca (m)	Desnivel máximo (m)	Aparición primer reguero (m)
Mo1-1	9034.94	14.32	28.5	161.98	23.2	67.58
Mo1-2	16304.68	8.91	20.5	194.26	17.3	18.79
Mo1-3	5064.93	11.56	15.7	84.76	9.8	φ

La cartografía de la red de regueros permite visualizar la distribución espacial de la red a lo largo de la superficie de Mo1-1 (figura 5.42) y de Mo1-2 (figura 5.43). Se trata de dos ejemplos de desarrollo, con mayor o menor longitud, de redes de regueros en el fondo de la vaguada de una cuenca hidrológica de perfil lateral cóncavo. Observando la figura 5.42, cabe resaltar que, además del reguero desarrollado en el fondo de la vaguada, también ha incidido un canal aprovechando el surco de cerrada que deja la vertedera (A-B en figura 5.42) en su último pase. Dicho surco atraviesa Mo1-1 perpendicularmente a la máxima pendiente, hecho que ofrece el dato de la dirección de los surcos de labor seguida en estas dos microcuencas: aproximadamente perpendicular a la máxima pendiente.

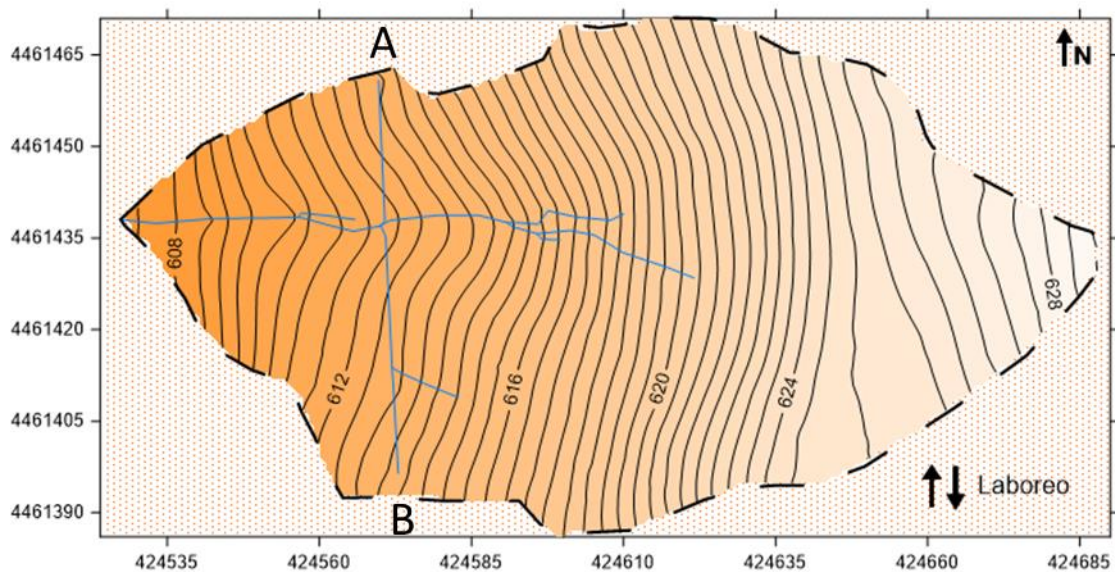


Figura 5.42: Mapa topográfico de Mo1-1 con la posición de la red dendrítica de regueros desarrollados. Los dos regueros perpendiculares a la máxima pendiente se deben a la existencia de un surco de cerrada de vertedera. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 0.5 m. La escala del mapa se corresponde con las coordenadas UTM en m.

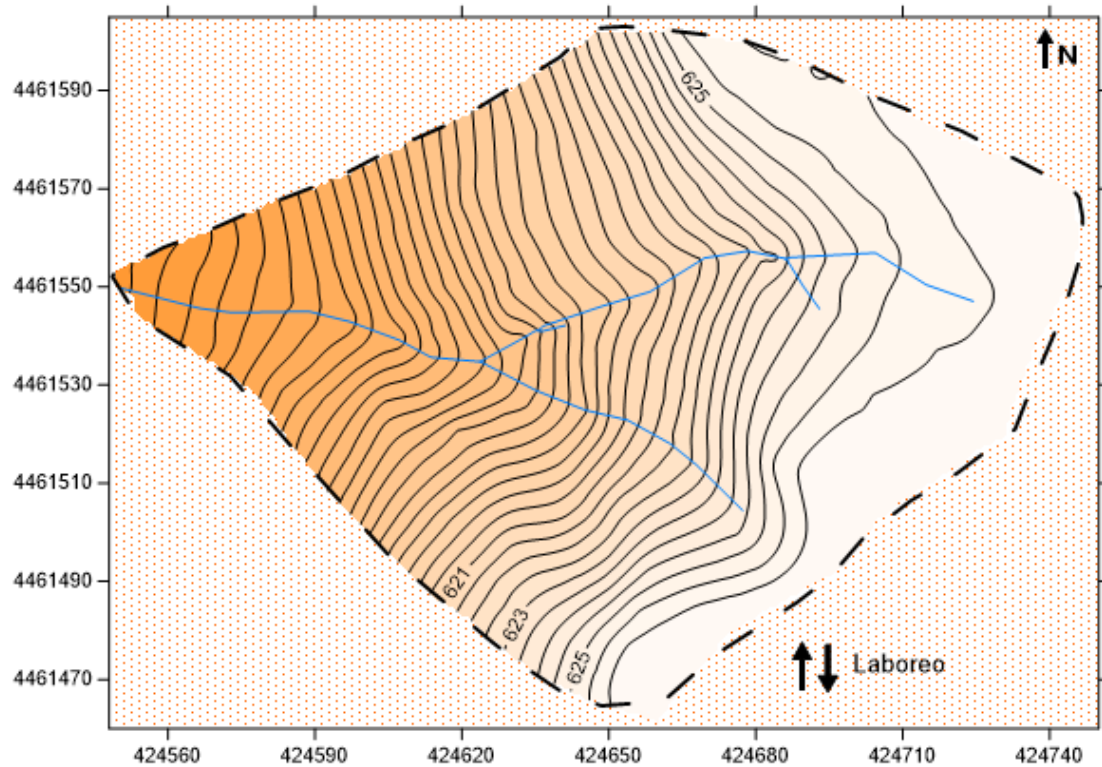


Figura 5.43: Mapa topográfico de Mo1-2 con la posición de la red dendrítica de regueros desarrollados. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 0.5 m. La escala del mapa se corresponde con las coordenadas UTM en m.

El resultado de la cubicación de la erosión llevada a cabo en estas microcuencas aparece en la tabla 5.29. El volumen total de suelo desalojado por el desarrollo de incisiones fue de 7.38 y 22.24 m³ para Mo1-1 y Mo1-2, respectivamente, lo que supuso unas tasas de erosión de suelo de 13.2Mg ha⁻¹ para Mo1-1 y de 22.1 Mg ha⁻¹ para Mo1-2 considerando también la erosión laminar. La tasa de erosión anual equivalente, para un periodo de retorno de 2.15 años, fue de 6.16 y 10.28 Mg ha⁻¹ año⁻¹ para Mo1-1 y Mo1-2, respectivamente (tabla 5.29).

En Mo1-3 el laboreo desarrollado con la vertedera fue a favor de la máxima pendiente, como puede observarse en la foto 5.22. Esta es otra de las diferencias existentes entre las microcuencas con desarrollo de regueros y Mo1-3, donde no se desarrollaron.



Foto 5.22: Ladera donde se ha localizado la microcuenca Mo1-3. Puede verse que el laboreo es a favor de la máxima pendiente.

Tabla 5.29: Resumen de la erosión por regueros en las microcuencas de Mo-1.

Cuenca	Fecha	Evento de lluvia erosivo (mm)	Estado del suelo previo a la erosión. Dirección surcos labor	Cárcava y/o reguero										EL	ET	TEAE
				L (m)	Número de cabeceras	D.D. (m m ⁻²)	Sección			R.A.P.		Erosión				
							Media (m ²)	c.v.	n	Media	c.v.	V (m ³)	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹ año ⁻¹	
Mo1-1	15 y 16 de febrero de 2010	44.6	Barbecho Perpendiculares a c.n.	208.43	7	0.023	0.0310	0.89	53	2.30	1.04	7.38	10.83	2.41	13.2	6.16
Mo1-2	15 y 16 de febrero de 2010	44.6	Barbecho Perpendiculares a c.n.	264.66	4	0.016	0.0756	0.77	40	2.36	0.76	22.24	18.09	4.02	22.1	10.28
Mo1-3	15 y 16 de febrero de 2010	44.6	Barbecho Perpendiculares a c.n.	Φ	Φ	Φ	Φ	Φ	Φ	Φ	Φ	Φ	Φ	Φ	Φ	Φ

Siendo: L: longitud; D.D.: densidad de drenaje; c.v.: coeficiente de variación; n: número de secciones medidas; R.A.P.: relación anchura-profundidad; V: volumen; c.n.: curvas de nivel; EL: Erosión laminar estimada; ET: erosión total; TEAE: Tasa de erosión anual equivalente (relación entre la tasa de erosión del evento y el periodo de retorno de la precipitación que la ha generado).

5.2.4.3.2. Móstoles campo 2 (Mo-2)

En la ladera Mo-2 se desarrolló una red dendrítica de regueros sobre una ladera con una ligera concavidad en su parte baja. La cartografía de la red de regueros permite visualizar que se trata de un ejemplo de desarrollo de una red de regueros a favor de un fondo de vaguada, si bien no exclusivamente existen regueros en esta línea de drenaje principal (figura 5.44). En la parte superior de la ladera existe una desconexión de las cabeceras de los regueros con el resto de la red debido a un cambio de pendiente, que produjo una zona de depósitos intermedia.

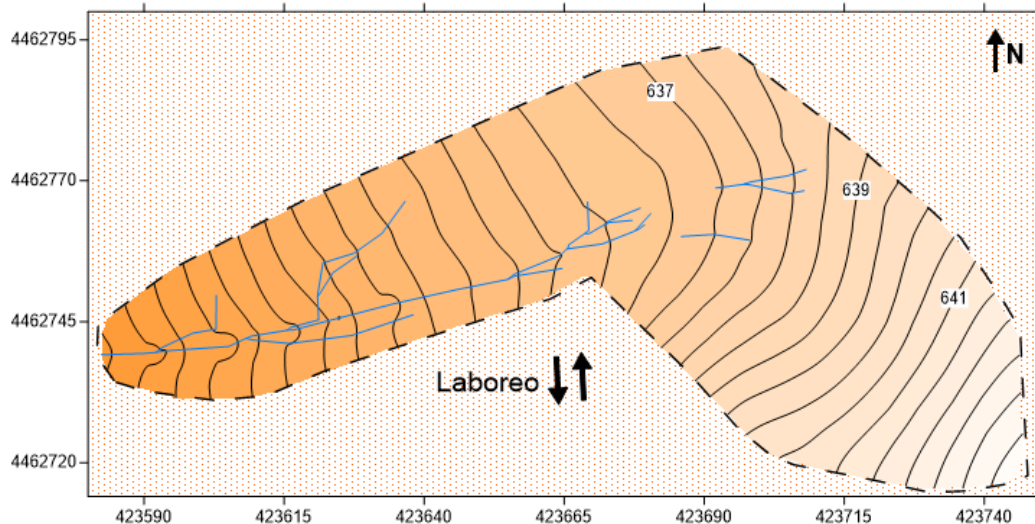


Figura 5.44: Mapa topográfico de Mo-2 con la posición de la red dendrítica de regueros desarrollados. La equidistancia entre las curvas de nivel es de 0.5 m. La escala del mapa se corresponde con las coordenadas UTM en m.

La ladera Mo-2 abarca un total de 0.65 ha y presenta una pendiente media del 11.06%. En este campo de cultivo los surcos de labor se orientaron siguiendo una dirección aproximada Norte-Sur. Este hecho produjo dos direcciones de los surcos de labranza respecto a la máxima pendiente: en la parte alta, la dirección de los surcos de labor y la máxima pendiente fueron *quasi* coincidentes, por lo tanto, el laboreo se realizó en esta superficie a favor de la máxima pendiente, mientras que en la parte inferior del campo, los surcos de labor adoptaban una posición *quasi* perpendicular respecto a la máxima pendiente.

Esta particularidad del campo hace que el cálculo de la aparición del primer reguero sea compleja. Si se calcula a partir de un perfil longitudinal total, perpendicular a las curvas de nivel desde la de cota inferior a la de cota superior, la distancia de aparición del primer reguero fue de 62.55 m, para un perfil longitudinal total de 140.19 m, prácticamente la mitad de la superficie no presenta desarrollo de regueros. Sin embargo, si dicho perfil longitudinal no incluye la parte alta de la ladera, el valor de aparición del primer reguero hubiera sido de 15.97 m, relativamente próximo al límite del campo. Por lo tanto, allí donde la rugosidad orientada es perpendicular a la máxima pendiente la aparición del primer reguero se aproxima a la divisoria superior de aguas, mientras en la superficie en que la rugosidad orientada es a favor de la máxima pendiente no se produce aparición de morfologías erosivas.

En la tabla 5.30 pueden observarse algunos valores topográficos relevantes de Mo-2.

Tabla 5.30: Características topográficas de las superficies de estudio.

	Área (m ²)	Pendiente media (%)	Pendiente máxima (%)	Longitud de la microcuenca (m)	Desnivel máximo (m)	Aparición primer reguero (m)
Mo-2	6562.87	11.06	18.37	140.19	15.51	15.97

El resultado de la cubicación del suelo perdido en Mo-2 puede verse en la tabla 5.31. La pérdida total de suelo por el desarrollo de incisiones fue de 7.24 m³, lo que, ponderado en función de la superficie y considerando, a su vez, la erosión laminar estimada, ofrece una tasa de erosión de 19 Mg ha⁻¹. En este caso, la tasa de erosión anual equivalente, para un periodo de retorno de 2.37 años, fue de 8.02Mg ha⁻¹ año⁻¹.

Tabla 5.31: Resumen de la erosión por regueros en las microcuencas de Mo-2

Cuenca	Fecha	Evento de lluvia erosivo (mm)	Estado del suelo previo a la erosión. Dirección surcos labor	Cárcava y/o reguero										EL	ET	TEAE
				L (m)	Número de cabeceras	D.D. (m m ²)	Sección			R.A.P.		Erosión				
							Media (m ²)	c.v.	n	Media	c.v.	V (m ³)	Mg ha ⁻¹			
Mo-2	20 al 22 de diciembre de 2010	43.9	Barbecho. Oblicuos a c.n.	271.63	13	0.041	0.0259	1.72	65	2.44	0.76	7.24	15.55	3.46	19.0	8.02

Siendo: L: longitud; D.D.: densidad de drenaje; c.v.: coeficiente de variación; n: número de secciones medidas; R.A.P.: relación anchura-profundidad; V: volumen; c.n.: curvas de nivel; EL: Erosión laminar estimada; ET: erosión total; TEAE: Tasa de erosión anual equivalente (relación entre la tasa de erosión del evento y el periodo de retorno de la precipitación que la ha generado).

5.2.5. Otros episodios erosivos

Los estudios de erosión por cárcavas y regueros en campos de secano en condiciones mediterráneas por parte del grupo de investigación del que el autor forma parte en este momento no comienzan en este trabajo sino que se remontan a la década de los años 90 del pasado siglo con los primeros trabajos publicados por De Alba (ver, por ejemplo, De Alba, 1997; De Alba, 1998a, De Alba, 1998b). A efectos de disponer de un registro de erosión lo más completo posible, también se han considerado en este trabajo algunos de ellos para dotar a la base de datos elaborada de mayor robustez y completar el análisis de los episodios erosivos caracterizados en esta Tesis. Por ello, se presentarán en este apartado algunos de los episodios erosivos caracterizados dentro del proyecto de investigación MANERO, financiado por el Plan Nacional de I+D+I 2004-07 (Ref: AGL2004-00650, MEC), así como el episodio erosivo que se produjo en Rielves (Toledo) en agosto de 1995 y que se describe con detalle en la tesis doctoral de De Alba (1998).

5.2.5.1. Episodios erosivos estudiados dentro del proyecto MANERO

Se presenta, en este apartado, la información disponible de hasta cinco episodios erosivos caracterizados y cuantificados dentro de los términos municipales de Pedro Muñoz, Cebolla, Valdepeñas, Santa Olalla y Hormigos en las provincias de Toledo y Ciudad Real, todos ellos incluidos dentro del proyecto MANERO.

Los episodios erosivos de Arroyomolinos y Villarrubia de los Ojos, descritos con detalle en los apartados 5.2.1. y 5.2.2., están igualmente incluidos dentro del proyecto MANERO, ya que dicho proyecto se solapó en su parte final con el inicio de este trabajo de investigación.

La información disponible sobre los cinco episodios erosivos es limitada en comparación a los episodios anteriormente presentados, ciñéndose la misma a la publicada en la Memoria Técnica del Informe final MANERO de abril de 2008. La información disponible de los cinco episodios se expone en la tabla 5.32. En la misma puede observarse que se han caracterizado tres campos de cultivo sin rasgos de erosión que se situaban junto a otras laderas de similares características que si presentaban rasgos erosivos, se trata de los campos de cultivo Zorreras-3, Valde-2 y Horm-3. El objetivo de caracterizar estas superficies es el de realizar una comparativa posterior con aquellas superficies en que si se han desarrollado rasgos erosivos y poder establecer aquellas características que limitan o desencadenan el proceso erosivo.

Entre los cinco casos estudiados cabe diferenciar entre aquellos que, por las características de la precipitación, se tratan de eventos extremos de precipitación (más de 60 mm en 24 horas), que en este caso se corresponden a los eventos caracterizados en Santa Olalla y Valdepeñas; con aquellos eventos que se desencadenaron a partir de precipitaciones prolongadas, de menor intensidad pero importantes volúmenes de precipitación total acumulados, como son los casos de Hormigos y Cebolla. El episodio estudiado en Pedro Muñoz no es *sensu stricto* un evento extremo de precipitación, pero puede incluirse junto a los casos de Santa Olalla y Valdepeñas, ya que pese a no alcanzar los 60 mm de precipitación total acumulada, se produjo en apenas 75 minutos, lo que infiere una importante energía en la precipitación.

Tabla 5.32: Resumen de resultados de los episodios erosivos incluidos dentro del proyecto MANERO.
La orientación de la labor según la pendiente corresponde a 0° y perpendicular a la máxima pendiente a 90°.

Cuenca	Estado del suelo previo a la erosión/ Orientación labor (°)	Localización	Fecha	Evento de lluvia erosivo (mm)	Periodo Retorno (años)	Área (m²)	Pendiente media (%)	Textura (USDA)	Morfología en planta regueros	Núm. secciones medidas	Erosión cárcavas		EL	ET	TEAE
											V (m³)	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹ año ⁻¹
Zorreras-1	Barbecho/ 88°	Santa Olalla	Noviembre de 2006	65.2 (24h)	17	965.2	4.9	Franco arcilloso	Reg. dendríticos	98	6.52	91.19	20.26	111.5	6.56
Zorreras-2	Barbecho/ 88°	Santa Olalla	Noviembre de 2006	65.2 (24h)	17	1760	4.6	Franco arcilloso	Reg. dendríticos	362	19.39	148.73	33.05	181.8	10.69
Zorreras-3	Barbecho/ 0°	Santa Olalla	Noviembre de 2006	65.2 (24h)	17	>30000	5-9	Franco arcilloso	Sin regueros	φ	φ	φ	φ	φ	φ
Valde-1	Viñedo, suelo desnudo/ 45°	Valdepeñas	Junio de 2006	60 (24h)	11	6500	8.5	Franco arcilloso	Reg. dendríticos	25	12.3	30.28	6.73	37.0	3.36
Valde-2	Viñedo, suelo desnudo/ 0°	Valdepeñas	Junio de 2006	60 (24h)	11	11000	7.5	Franco arcilloso	Sin regueros	φ	φ	φ	φ	φ	φ
PMuñoz1-1	Viñedo, suelo desnudo/ 40°	Pedro Muñoz	Abril de 2006	50 (75 min)	8	2432	5	Franco arenosa	Reg. dendríticos	56	15.85	101.2	22.49	123.7	15.46
PMuñoz1-2	Viñedo, suelo desnudo/ 0°	Pedro Muñoz	Abril de 2006	50 (75 min)	8	960	5	Franco arenosa	Reg. confinados	23	0.28	4.52	1.00	5.5	0.69
Horm-1	Sembrado/ 88°	Hormigos	Noviembre de 2006	72 (72h)	<5*	259.1	10.1	Franco arenoso	Reg. dendríticos	92	5.12	316.09	70.24	386.3	77.27
Horm-2	Sembrado/ 88°	Hormigos	Noviembre de 2006	72 (72h)	<5*	1098	9.8	Franco arenoso	Reg. dendríticos	209	23.54	343.09	76.24	419.3	83.87
Horm-3	Sembrado/ 0°	Hormigos	Noviembre de 2006	72 (72h)	<5*	17121	10.5	Franco arenoso	Sin regueros	φ	φ	φ	φ	φ	φ
Ce-1	Olivar, suelo desnudo/ 45°	Cebolla	Diciembre de 2005	60 (48h)	<5*	3520	11.5	Arenosa franca	Reg. dendríticos	74	15	68.18	15.15	83.3	16.67
Ce-2	Olivar, suelo desnudo/ 0°	Cebolla	Diciembre de 2005	60 (48h)	<5*	760	11.5	Arenosa franca	Reg. confinados	30	0.12	2.53	0.56	3.1	0.62

*: Para el cálculo de la Tasa de erosión anual equivalente se han considerado 5 años de periodo de retorno de la precipitación pese a que no se tiene el dato exacto y se sabe que es algo inferior.

Siendo: V: volumen; EL: Erosión laminar estimada; ET: erosión total; TEAE: Tasa de erosión anual equivalente (relación entre la tasa de erosión del evento y el periodo de retorno de la precipitación que la ha generado).

En la tabla 5.32 también puede observarse que existieron importantes diferencias en las tasas de erosión entre los casos en que las redes erosivas de regueros desarrolladas fueron dendríticas y allí donde se desarrollaron regueros confinados. Un ejemplo paradigmático en este sentido se produjo en Pedro Muñoz, donde a iguales características topográficas y de textura del suelo en la ladera, allí donde se desarrollaron regueros dendríticos, la tasa de erosión superó los 100 Mg ha⁻¹, mientras que donde se desarrollaron regueros confinados se quedó en 5.5 Mg ha⁻¹.

5.2.5.2. Episodio erosivo de Rielves, Toledo

Excepcionalmente se dispone de una descripción de detalle de un episodio erosivo que se produjo en Rielves (Toledo) en agosto de 1995 debido a que se incluye en la tesis doctoral de De Alba (1998).

Dentro del término municipal de Rielves se estudiaron dos laderas con rasgos de erosión: Finca Rielves 1 y Finca Rielves 2. En cada una de las laderas agrícolas se individualizaron dos microcuencas que se nombraron, correlativamente, como Ri-1, Ri-2, en la Finca Rielves 1, y Ri-3 y Ri-4, en la Finca Rielves 2. Mientras en Ri-1 el desarrollo de la red de regueros presentó morfologías dendríticas, en Ri-2, Ri-3 y Ri-4 el desarrollo de regueros presentó una morfología confinada.

El cultivo habitual en los dos campos agrícolas estudiados es herbáceo, cereal, que suele sembrarse entre octubre y noviembre, en función de las precipitaciones estacionales, previa preparación del suelo con cultivador. En este caso, el suelo estaba en condiciones de barbecho blanco debido a la época del año, verano, en que se produjo la precipitación y había recibido un pase de vertedera con anterioridad a la precipitación.

La información disponible de las cuatro laderas estudiadas en Rielves se expone en la tabla 5.33. Cabe destacar la magnitud de la precipitación desencadenante del evento erosivo, ya que en apenas 40 minutos se acumularon hasta 70 mm de agua, dando lugar a un evento de erosión en que las tasas erosivas llegan a superar los 900 Mg ha⁻¹ en el caso de Ri-1. Dicha ladera es la única con desarrollo de regueros dendríticos y es, con diferencia, donde se produjeron los mayores volúmenes de suelo perdido. Aun así, en todos los casos, las tasas de erosión fueron muy elevadas. A destacar el hecho de que las laderas que presentaban un menor ángulo entre la dirección de la labranza realizada y la máxima pendiente son las que presentaron finalmente las tasas de erosión menores.

*Tabla 5.33: Resumen de resultados del episodio erosivo desencadenado en Rielves en agosto de 1995 (De Alba, 1998).
La orientación de la labor según la pendiente corresponde a 0° y perpendicular a la máxima pendiente a 90°.*

Cuenca	Estado del suelo previo a la erosión/ Orientación labor (°)	Localización	Fecha	Evento de lluvia erosivo (mm)	Periodo Retorno (años)	Área (m ²)	Pendiente media (%)	Textura (USDA)	Morfología en planta regueros	Núm. secciones medidas	Erosión cárcavas		EL	ET	TEAE
											V (m ³)	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹	Mg ha ⁻¹ año ⁻¹
Ri-1	Barbecho/ 84°	Rielves	Agosto de 1995	70 (40 min)	9	640	9.8	Franco arcillo arenosa	Reg. dendríticos	126	55.85	754.8	167.73	922.5	102.50
Ri-2	Barbecho/ 11°	Rielves	Agosto de 1995	70 (40 min)	9	3322	8.3	Franco arcillo arenosa	Reg. confinados	120	36.34	224.2	49.82	274.0	30.45
Ri-3	Barbecho/ 6°	Rielves	Agosto de 1995	70 (40 min)	9	564	17	Franco arcillo arenosa	Reg. confinados	35	4.79	119.0	26.44	145.4	16.16
Ri-4	Barbecho/ 23°	Rielves	Agosto de 1995	70 (40 min)	9	881	14.5	Franco arcillo arenosa	Reg. confinados	66	19.29	306.6	68.13	374.7	41.64

Siendo: V: volumen; EL: Erosión laminar estimada; ET: erosión total; TEAE: Tasa de erosión anual equivalente (relación entre la tasa de erosión del evento y el periodo de retorno de la precipitación que la ha generado).

En De Alba (1998) están incluidas las cartografías de detalle de las cuatro redes de regueros caracterizadas en Rielves. La misma se realizó utilizando el método de los transectos (ver apartado 4.2.2.2.), sin diferenciar en función de la morfología de regueros desarrollada. Las cartografías de las redes de regueros permiten visualizar la distribución espacial de las redes a los largo de las superficies caracterizadas.

En Ri-1, figura 5.45, cabe resaltar dos aspectos: la cercanía entre la divisoria superior de aguas y la aparición del primer reguero y la morfología dendrítica de la red de regueros. Se trata de un caso particular, ya que la superficie afectada por la erosión de regueros, microcuenca Ri-1, está delimitada en su parte superior por un surco de cerrada de vertedera. Este surco, que puede observarse en la figura 5.45 indicado como C1, presentaba una dirección aproximadamente perpendicular a la máxima pendiente de la ladera. La posición topográfica del surco de cerrada hizo que funcionase a modo de canal colector de la escorrentía procedente de aguas arriba de la ladera. A su vez, la existencia de cierta pendiente lateral convergente hacia el centro del surco de cerrada provocó que dicha escorrentía se acumulase lateralmente. Estas características produjeron que en el punto de convergencia lateral de aguas dentro del surco de cerrada pudiese producirse un acumulo de agua. Cuando el volumen de agua resultó suficiente para superar el caballón del surco de cerrada de la vertedera se produjo la ruptura del surco y la incisión de un primer reguero aguas abajo. También puede observarse la existencia de una segunda incisión a partir del surco de cerrada de la vertedera.

La existencia de este surco de cerrada, amplía la superficie colectora de agua más allá de la microcuenca delimitada. Esta superficie “extra” ha sido considerada a la hora de determinar la tasa de erosión asociada a Ri-1.

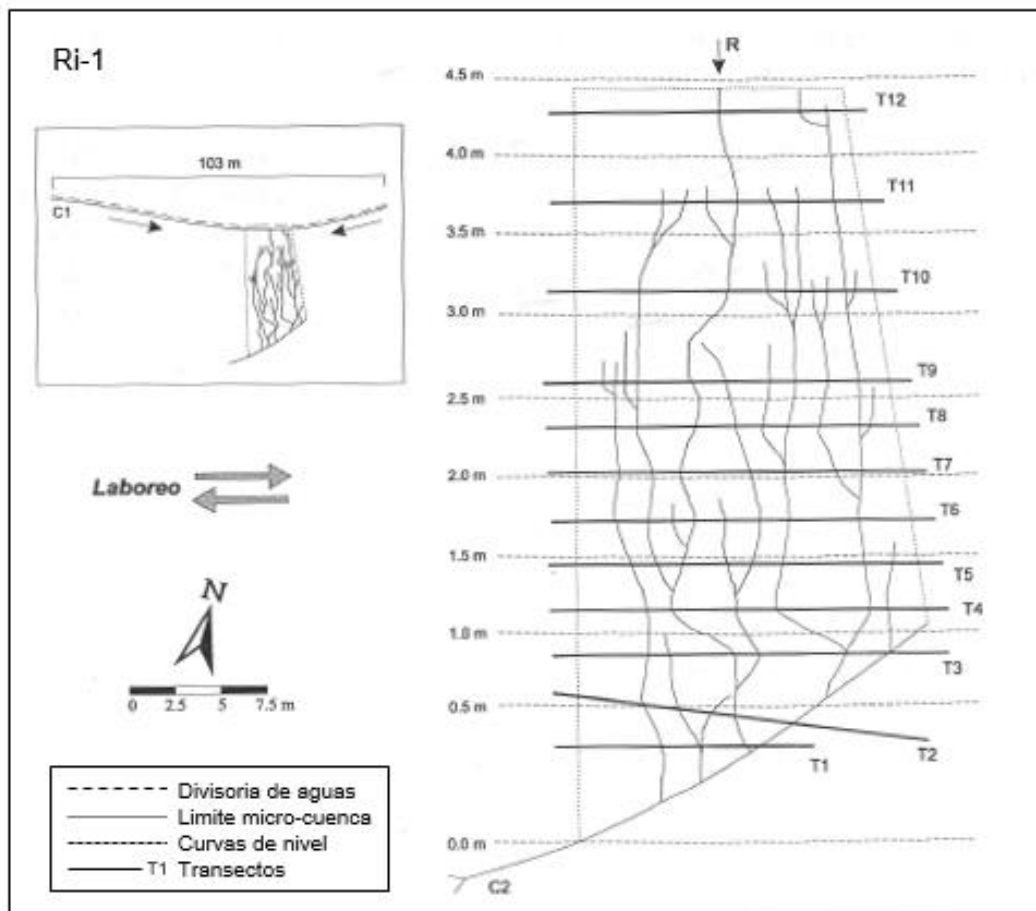


Figura 5.45: Cartografía de los sistemas de regueros de Ri-1 (tomado de De Alba, 1998).

Por último, indicar el hecho de que no se pudo caracterizar la totalidad de la red de regueros. Mientras se estaba realizando el trabajo de campo, el propietario de la finca no observó adecuado el trabajo que se estaba realizando y, para interrumpir la toma de datos, introdujo maquinaria en la finca y labró el suelo, eliminando de esa manera los regueros desarrollados. Es por ello que la pérdida de suelo puede considerarse como la mínima producida en Ri-1. En la figura 5.45, en la parte inferior de la microcuenca, se observa un límite en forma de arco sobre la superficie (C2). Este límite de la superficie estuvo propiciado artificialmente por la actuación del propietario de la finca.

En el caso de Ri-2, figura 5.46, llama la atención la superficie no afectada por la erosión. El cinturón de no erosión definido por Horton (1945) es muy notable, ya que más de un tercio de la superficie no presenta erosión por flujos concentrados.

Por otro lado, la morfología en planta de los regueros, que es confinada, lo es de una manera un tanto particular. Pese a que los regueros se han desarrollado confinados en los surcos de labor, presentan una importante tendencia a converger aguas abajo, debido a la influencia de la morfología de la ladera. Como puede verse en la figura 5.46, la ladera presenta forma de cuello de botella aguas abajo. Esta particularidad hace que la dirección de labor seguida por la maquinaria sobre la ladera, pese a ser a favor de la máxima pendiente, no sea paralela entre sí. Por una cuestión práctica, la maquinaria ha subido y bajado por la ladera de forma paralela a cada uno de los límites de la ladera. De esta manera, existe una tendencia a la convergencia de los surcos en la parte inferior de la superficie. Como los regueros se han desarrollado en el interior de los surcos de labor, esta convergencia de los surcos es la misma que presentan los regueros desarrollados. Estas capturas entre regueros influyen notablemente en los valores de las secciones aguas abajo, que se incrementan de manera notable al incrementar su caudal.

Por último, los casos de Ri-3 y Ri-4, están desarrollados de forma paralela sobre una misma ladera, que se ha denominado como Finca Rielves 2. La cartografía de las redes de regueros, que puede observarse en la figura 5.47, permite visualizar la distribución espacial de las mismas a lo largo de las superficies de Ri-3 y Ri-4. En ambos casos la rugosidad orientada, dirección de los surcos de labranza, es paralela a la máxima pendiente.

El caso de Ri-3 es un ejemplo paradigmático de regueros confinados. En el mismo, los regueros inciden a la misma distancia desde la divisoria superior de aguas, lo que demuestra un comportamiento individualizado de cada uno de los surcos a modo de cuenca de drenaje que, al no mostrar diferencias en las características del suelo, ni de pendiente entre ellas, ofrecen la misma respuesta erosiva, presentando las incisiones en la misma posición de forma paralela.

El caso de Ri-4, cuya morfología en planta es confinada, presentan también una cierta convergencia a favor de las direcciones de los surcos de labor previamente roturados sobre el campo de cultivo en su parte derecha (observándolo aguas abajo). Cabe diferenciar dos áreas sobre la misma ladera: en la parte izquierda de la ladera (observándola aguas abajo) la dirección de las curvas de nivel y la de la labranza es muy próxima a la perpendicularidad, en esta zona los regueros son perfectamente paralelos; en el lado opuesto de la ladera, se produce una modificación en la dirección de las curvas de nivel. Al mantenerse la dirección de la labranza sobre el campo, sobre esta superficie se produce un laboreo oblicuo a la máxima pendiente, que produce convergencia (rotura lateral de caballones) de regueros. Esto produce mayores volúmenes de agua en los regueros y, en consecuencia, volúmenes mayores de pérdida de suelo.

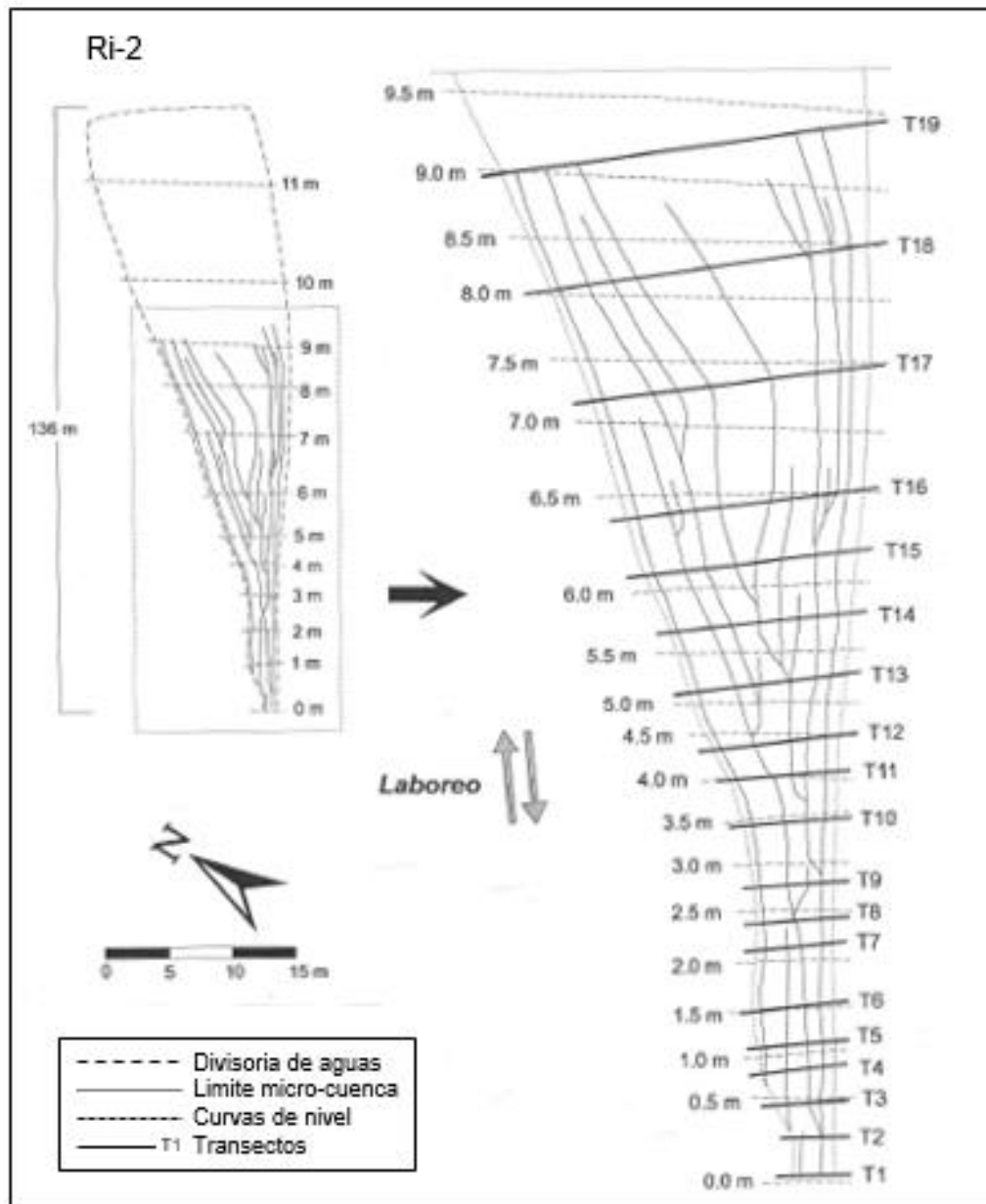


Figura 5.46: Cartografía de los sistemas de regueros de Ri-2 (tomado de De Alba, 1998).

En la tabla 5.34 se presentan los valores de sección media, de densidad de drenaje y de Relaciones Anchura-Profundidad (RAP) de las cuatro microcuencas caracterizadas en Rielves. Observando los valores de las secciones medias de los canales se puede distinguir que los valores mayores son los de Ri-1, lo cual resulta esperable al tratarse de una red dendrítica de regueros, que al presentar el mayor número de convergencias termina por presentar, aguas abajo, secciones de canal importantes que permiten desaguar la totalidad de la escorrentía caída sobre la cuenca de drenaje.

En el extremo opuesto, con el valor menor de sección media, se sitúa Ri-3. Tratándose de una red de regueros confinados, sin captura ninguna, se produce la mayor división de la escorrentía total, la cual se divide entre el número de surcos existente. Este hecho limita los caudales para cada uno de los surcos y, por ende, el tamaño del canal de desagüe, reguero, desarrollado.

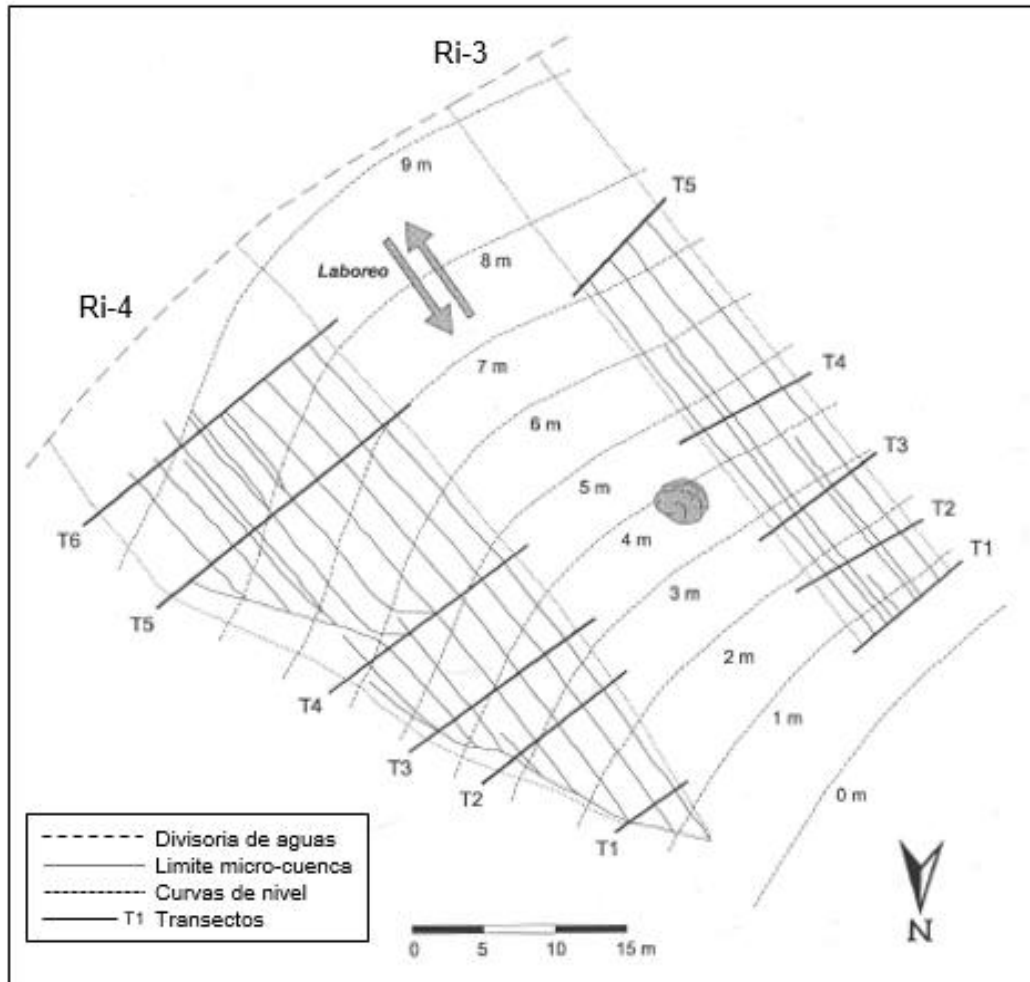


Figura 5.47: Cartografía de los sistemas de regueros de Ri-3 y Ri-4 (tomado de De Alba, 1998).

En posiciones intermedias, en cuanto a los valores de sección media, se sitúan Ri-2 y Ri-4. Ambas se tratan de redes confinadas de regueros que presentan, por diversas circunstancias anteriormente explicadas, algunas convergencias entre regueros.

Estos valores de sección media de los canales se corresponden con las tasas de erosión de suelo producidas, con la excepción de Ri-2 y Ri-4. En este caso, Ri-2 presenta una menor tasa de erosión que Ri-4 debido a que el cinturón de no erosión de Horton (1945) en este caso es mucho mayor. Dicha superficie sin erosión disminuye notablemente la tasa de erosión, a pesar de que las secciones medias de los canales sean superiores. Esta importante superficie sin erosión aguas arriba también produce que la densidad de drenaje de Ri-2 sea la menor de las cuatro microcuencas.

Tabla 5.34: Resumen de la erosión por regueros en las microcuencas estudiadas en Rielves. Tomado de De Alba, 1998.

Microcuenca	Morfología de la red	Tasa de erosión (Mg ha ⁻¹)	D. D. (m m ⁻²)	Sección			RAP	
				Media	c.v.	n	Media	c.v.
Ri-1	Dendrítica	838.7	0.356	0.1530	0.92	126	2.68	0.61
Ri-2	Confinada	249.1	0.166	0.1103	0.92	120	2.21	0.36
Ri-3	Confinada	132.2	0.328	0.0277	0.53	35	1.83	0.54
Ri-4	Confinada	340.7	0.443	0.0534	0.70	66	3.32	0.71

5.3 Discusión de los resultados obtenidos en los episodios erosivos

Los estudios sobre erosión llevados a cabo en esta Tesis sobre campos de cultivos extensivos de secano en condiciones climáticas mediterráneas indican que la formación de cárcavas efímeras y regueros ocurre con carácter generalizado sobre los campos en barbecho ante precipitaciones erosivas. Así se han observado estos fenómenos erosivos no solo en las laderas donde se han efectuado mediciones sino en las adyacentes en mayor o menor grado (no pudiéndose abordar un mayor número de medidas en campo por diferentes limitaciones, entre ellas la importante inversión temporal requerida en algunos de los episodios en la aplicación del Método de la Nube de Puntos en los casos de las redes dendríticas de regueros). Igualmente, se ha observado que el desarrollo de cárcavas efímeras y regueros no se circunscribe a un modelo de precipitación concreto, de carácter extremo y con importantes periodos de retorno, como es común encontrar en la bibliografía (ver, por ejemplo, De Alba, 1998; Martínez Casanovas et al., 2002). Si bien los eventos extremos de precipitación desencadenan los episodios erosivos con mayores tasas de erosión, ejemplo de ello en este estudio son los casos de Rielves y Villarrubia de los Ojos, en este mismo trabajo se han caracterizado una serie de episodios erosivos desencadenados a partir de eventos de precipitación de moderada y baja intensidad y frecuencia, situaciones de temporal típicamente invernales, en las que cuando el suelo llega a estar próximo a la saturación es suficiente que se produzcan lluvias de moderada e incluso baja intensidad para producir efectos erosivos por flujos concentrados de magnitudes reseñables.

En resumen, se han identificado dos situaciones meteorológicas diferentes en las que tiene lugar la mayor parte de la erosión, entendiendo que esta se produce asociada al desarrollo de flujos concentrados. La primera corresponde a las tormentas aisladas de elevada intensidad de lluvia, que suelen corresponder a células convectivas de desarrollo vertical típicas del verano mediterráneo. La segunda, se trata de situaciones meteorológicas de temporal, generalmente invernales, en las que se encadenan varios días de lluvia consecutivos que dan lugar a elevadas precipitaciones acumuladas. En ambos casos, el factor clave desencadenante de la erosión es la acumulación y drenaje del agua de escorrentía sobre la superficie del suelo. En el primer caso, porque la intensidad de lluvia es muy superior a la capacidad de infiltración de la capa superficial del suelo; y en el segundo, porque una vez que el perfil de suelo se satura, la infiltración de agua se reduce drásticamente.

Por otro lado, una vez caracterizados todos los campos de cultivo abordados dentro de este trabajo, así como cuantificada la erosión producida en los mismos, resulta fundamental evaluar la importancia de los diferentes eventos erosivos, tanto en términos de gravedad de los mismos para la conservación y/o explotación de los suelos agrícolas, como en términos de representatividad de los casos de estudio desarrollados. Igualmente se determinará la importancia relativa de los efectos de los episodios erosivos extremos frente a aquellos episodios erosivos que no llegan a producir erosión generalizada por flujos concentrados y en los cuales las pérdidas de suelo se producen ligadas a los procesos de erosión difusa (*splash erosion* y *overland flow*) y de erosión por pequeños regueros aislados.

Como primera aproximación a la evaluación de la degradación de los suelos estudiados, cabe recordar la presencia de manchas de color claro en las hombreras de las propias laderas de estudio o en laderas adyacentes. Este hecho es un indicio cualitativo de la fuerte degradación presente en los suelos estudiados, ya que anuncian la existencia de perfiles truncados, con horizontes subsuperficiales que quedan expuestos en superficie por la erosión (Gallardo et al., 1990). Esta aproximación cualitativa se ve refrendada con la descripción de los perfiles de los suelos estudiados, en los cuales se observaron horizontes poco desarrollados y escasas profundidades. El más profundo de los perfiles descritos se situó en Ajalvir (tabla 5.21), donde el último horizonte descrito tenía su contacto superior a 75 cm de profundidad. Tanto en Paracuellos del Jarama (tabla 5.21) como en Arroyomolinos (tabla 5.3), que también es el perfil

de referencia para los dos campos de cultivo estudiados en Móstoles, los horizontes más profundos descritos comenzaron a partir de los 60 cm. El caso de Villarrubia de los Ojos (tablas 5.12 y 5.13) aún presentó un menor desarrollo, con el horizonte C a partir de los 40 y 30 cm para los perfiles de Vo-1 y Vo-2, respectivamente.

Por debajo de las profundidades anteriormente apuntadas se desconoce el desarrollo del perfil en los casos de Ajalvir y Paracuellos, si bien es esperable que existiese un horizonte C a profundidad indeterminada*. Por lo tanto, se considerarán dichas profundidades como las profundidades efectivas del suelo para la posterior discusión. Cabe mencionar que no se dispone de las descripciones de los perfiles del suelo ni en el caso de Rielves, ni en los estudios incorporados desde el proyecto MANERO.

A la existencia de horizontes poco desarrollados, con perfiles poco profundos, hay que añadir condiciones agronómicas poco favorables para el desarrollo de los cultivos en la gran mayoría de los suelos estudiados. Para el análisis de este punto se considerarán, por un lado, los contenidos en arcillas presentes en el suelo y por otro lado, las propiedades químicas de los suelos.

Las arcillas controlan las propiedades más importantes del suelo, incluyendo la capacidad de intercambio de iones entre las partículas del suelo y el agua presente. Si bien un exceso de arcillas tampoco es bueno, pudiendo generar problemas graves de drenaje entre otras repuestas, una ausencia o escasez de las mismas limita gravemente la capacidad agronómica de los suelos. Las laderas estudiadas presentan suelos con importantes contenidos de arena y escasos contenidos de arcillas. Se trata de suelos con texturas mayoritariamente franco arenosas, con un contenido de arcillas inferior al 20%, siendo especialmente llamativo el bajo contenido de arcillas en el caso de Villarrubia de los Ojos. Los casos de Paracuellos del Jarama y Ajalvir presentan una textura predominante franco arcillo arenosa, con un contenido de arcillas algo superior a los demás casos estudiados, pero inferior al 30% (tabla 5.35). Esta misma diferenciación puede realizarse en los casos estudiados dentro del proyecto MANERO y en el caso de Rielves, pese a contar con una información mucho más limitada. Sin embargo, si se toman como referencia las texturas de los suelos, pueden considerarse sustratos desfavorables agronómicamente los suelos estudiados en Rielves, Pedro Muñoz, Hormigos y Cebolla por presentar texturas franco arenosas, arenosas francas y franco arcillo arenosas, con bajos o muy bajos contenidos en arcillas (tabla 5.35). Con mayores contenidos de arcillas se encuentran los casos de Las Zorreras y Valdepeñas, que presentan texturas franco arcillosas, con contenidos en arcillas de entre un 30 y un 40% del total.

*: La decisión de no continuar profundizando en el perfil del suelo resulto de una combinación de falta de material y condiciones adecuadas que permitiesen hacerlo (no se contaba con retroexcavadora, ni existía ningún perfil natural del suelo sobre el terreno que permitiese acceder a mayor profundidad de forma sencilla), junto al hecho de que por debajo solo podría aparecer un horizonte C que no aportaría información adicional relevante del suelo que justificase continuar con el trabajo.

Tabla 5.35: Propiedades físicas de los suelos muestreados. Los datos se refieren al horizonte superficial (20 cm). a: arena (2-0.05 mm); l: limo (0.05-0.002 mm); arc: arcilla (< 0.002 mm). ρ_a : densidad aparente.

Campo	a (%)	l (%)	Arc (%)	Textura (USDA)	Campo	a (%)	l (%)	Arc (%)	Textura (USDA)
Ay-1	81	9.5	9.5	Arena franca	Aj-1	64.16	8.96	26.88	Franco arcillo arenosa
Ay-1	71.5	13	15.5	Franco arenosa	Aj-1	52.20	12.92	34.88	Franco arcillo arenosa
Ay-1	61.5	17	21.5	Franco arcillo arenosa	Aj-2	57.25	13.99	28.76	Franco arcillo arenosa
Ay-1	57.5	16	26.5	Franco arcillo arenosa	Mo1-1	75.67	6.34	17.99	Franco arenosa
Ay-1	77	6.5	16.5	Franco arenosa	Mo1-2	69.47	7.38	23.15	Franco arcillo-arenosa
Ay-1	77	11.5	11.5	Franco arenosa	Mo1-3	76.64	5.59	17.78	Franco arenosa
Ay-2	78.5	10.5	11	Franco arenosa	Mo-2	76.71	7.60	15.70	Franco arenosa
Ay-2	83.5	9	7.5	Arena franca	Zorreras-1	φ	φ	φ	Franco arcilloso
Ay-2	70	13	17	Franco arenosa	Zorreras-2	φ	φ	φ	Franco arcilloso
Ay-2	83	7	10	Arena franca	Zorreras-3	φ	φ	φ	Franco arcilloso
Ay-2	88	5.5	6.5	Arena franca	Valde-1	φ	φ	φ	Franco arcilloso
Ay-2	72	13.5	14.5	Franco arenosa	Valde-2	φ	φ	φ	Franco arcilloso
Vo1-1	73.62	17.76	8.62	Franco arenosa	PMuñoz1-1	φ	φ	φ	Franco arenosa
Vo1-2	78.15	15.82	6.03	Franco arenosa	PMuñoz1-2	φ	φ	φ	Franco arenosa
Vo1-3	87.73	7.51	4.76	Arenosa franca	Horm-1	φ	φ	φ	Franco arenoso
Vo2-1	75.81	14.11	10.08	Franco arenosa	Horm-2	φ	φ	φ	Franco arenoso
Vo3-1	74.35	17.10	8.55	Franco arenosa	Horm-3	φ	φ	φ	Franco arenoso
Vo3-2	69.56	19.87	10.56	Franco arenosa	Ce-1	φ	φ	φ	Arenosa franca
Vo3-3	60.70	19.40	19.90	Franco arenosa	Ce-2	φ	φ	φ	Arenosa franca
Pj-1	51.15	9.56	39.28	Franco arcillosa	Ri-1	φ	φ	φ	Franco arcillo arenosa
Pj-2	48.55	9.87	41.57	Arcillo arenoso	Ri-2	φ	φ	φ	Franco arcillo arenosa
Pj-3	61.50	9.24	29.26	Franco arcillo arenosa	Ri-3	φ	φ	φ	Franco arcillo arenosa
Pj-4	51.50	12.97	35.55	Franco arcillosa	Ri-4	φ	φ	φ	Franco arcillo arenosa

Del análisis de las propiedades químicas de los suelos estudiados inicialmente destaca el bajo contenido en carbono orgánico presente en las muestras. En este aspecto, las funciones del suelo se ven directamente afectadas por la cantidad y calidad de la materia orgánica que contiene, ya que ésta incide directa e indirectamente sobre las propiedades físicas, químicas y biológicas del suelo. Por todo ello, se puede afirmar que la materia orgánica constituye un indicador importante de la calidad del suelo y de su productividad (Larson y Pierce, 1994; Gregorich y Carter, 1997; Franzluebers, 2002 en Porta et al., 2003). Los valores obtenidos son, en la práctica totalidad, inferiores al 1%, exceptuando el caso de Paracuellos del Jarama, con un valor algo superior: 1.22% (tabla 5.36). Dichos valores, pese a ser bajos, no resultan especialmente llamativos, ya que la escasez de materia orgánica en los suelos agrícolas es una constante en las regiones mediterráneas, debido, principalmente, al clima y al sistema de cultivo que se basa fundamentalmente en un laboreo continuo y en la aplicación de abonos minerales para el mantenimiento de la fertilidad (Zalidis et al., 2002). Por lo tanto, se puede afirmar que todos los suelos desarrollados en condiciones mediterráneas, *a priori* parten con un déficit agronómico importante, con lo cual deben de ser susceptibles de una mayor atención en su conservación.

Tabla 5.36: Propiedades químicas de los suelos muestreados en las laderas de estudio. Los datos se refieren al horizonte superficial (20 cm). MO: materia orgánica. CE: conductividad eléctrica. CIC: Capacidad de intercambio catiónico. RAS: Relación de adsorción de sodio.

Campo	MO (%)	pH	CE (dS/m)	Ca ²⁺ (cmol/Kg)	Mg ²⁺ (cmol/Kg)	Na ⁺ (cmol/Kg)	K ⁺ (cmol/Kg)	CIC (cmol/Kg)
Ay-1	0.72	6.14	0.08	0.37	0.97	0.13	0.37	10.36
Ay-2	0.79	6.42	0.04	4.07	0.9	0.15	0.23	8.3
Vo	0.40	5.91	0.06	φ	φ	φ	φ	φ
Aj	0.72	8.15	0.15	10.4	0.61	0.1	0.3	12.66
Pj	1.22	6.54	0.21	5.23	1.52	0.15	0.42	13.13
Mo	0.60	6.94	0.13	4.79	0.97	0.13	0.37	10.36

Para conocer la salinidad de los suelos se determinó la conductividad eléctrica de los mismos, ya que la capacidad del suelo para conducir la electricidad aumenta con la concentración de sales. Una elevada salinidad afecta notablemente a los cultivos, sin embargo, los valores de conductividad obtenidos en estos casos son muy bajos, en todos los casos muy por debajo de 2 dS m⁻¹ (tabla 5.36), que es el límite superior de los valores de conductividad para los suelos no salinos (FAO, 1988). Se trata, por tanto, de suelos sin ningún tipo de restricción para los cultivos por efecto de la salinidad. A este respecto, un indicador cualitativo de alta salinidad en el suelo es la presencia de costras salinas, manchas blanquecinas en superficie, hecho que no se produjo en ninguno de los campos de cultivo estudiados.

Los valores de pH son variables según el escenario en el que nos situemos, aunque en todos los casos, excepto en Ajalvir, se trata de valores de pH por debajo de 7. Según Page et al. (1982), el suelo de Villarrubia de los Ojos, pH de 5.91, es moderadamente ácido, los de Arroyomolinos, pH de 6.14 y 6.42, y Paracuellos, pH de 6.54, son ligeramente ácidos y el de Móstoles, pH de 6.94, es neutro; mientras que el suelo presente en Ajalvir, pH de 8.15, es fuertemente alcalino (tabla 5.36).

Por último, los valores de capacidad de intercambio catiónico (CIC) muestran que son los suelos de Ajalvir y Paracuellos del Jarama los que presentan unas mejores condiciones agronómicas. Por un problema con las muestras no se pudieron analizar los cationes de cambio ni la CIC en el caso de Villarrubia de los Ojos. Igualmente no se cuenta con esta información de las características químicas de los suelos de los casos de estudio incorporados desde el proyecto MANERO, así como del caso de Rielves.

En resumen, la existencia generalizada entre los casos de estudio de perfiles edáficos poco desarrollados con bajos contenidos en materia orgánica, siendo el pH ligeramente ácido y bajos los contenidos en arcillas, permiten afirmar que nos encontramos, en general, ante suelos con sustratos desfavorables agronómicamente, fuertemente degradados por la erosión y que requieren de la aplicación de medidas de conservación. La situación más desfavorable, en este aspecto, se produce en Villarrubia de los Ojos, donde se ha determinado el menor de los contenidos en arcillas de los suelos estudiados, motivo por el cual el perfil presenta el pH más ácido, 5.91. En este caso, no se pudieron analizar los cationes de cambio ni la CIC, pero es de esperar fuesen los menores de todas las muestras. En el extremo opuesto, el caso de Ajalvir, que presentó un pH alcalino, 8.15, y los mayores contenidos en arcillas junto con Paracuellos del Jarama, pudiendo unir a estos casos, aunque sin contar con toda la información necesaria, los casos de Valdepeñas y Las Zorreras que presentan unas condiciones agronómicas no tan desfavorables.

A continuación se abordará la gravedad de la erosión cuantificada en episodios erosivos concretos estudiados en comparación con las tasas de pérdida tolerable de suelo (T) que se han citado en el apartado 2.1 de la introducción de este trabajo: clasificaciones de la SCS (1973) y de Moreira (1991). Para facilitar el seguimiento de la discusión se incluye, de nuevo, en este punto la tabla 2.1, renombrada como tabla 5.37.

Tabla 5.37: Valores máximos de pérdida tolerable de suelo (SCS, 1973 y Moreira, 1991).

Profundidad efectiva del suelo	Sustrato favorable (SCS, 1973) (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Sustrato desfavorable (SCS, 1973) (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	Valle del Guadalquivir Moreira (1991) (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)
< 25 cm	2.2	2.2	0.2
25 – 50 cm	4.5	2.2	1.1-1.8
50 – 100 cm	6.7	4.5	1.7-2.5
100 – 150 cm	9.0	6.7	5.0-7.0
> 150 cm	11.2	11.2	5.3-7.1

A partir del análisis desarrollado con anterioridad en este mismo apartado sobre las características de los diferentes perfiles edáficos estudiados, será asumido un perfil de referencia de entre 50 y 100 cm de profundidad para esta comparativa. Por lo tanto, los valores máximos de pérdida tolerable de suelo en estos casos serían de 6.7 Mg ha⁻¹ año⁻¹ en condiciones de sustrato favorables y de 4.5 Mg ha⁻¹ año⁻¹ ante sustratos desfavorables, desde un punto de vista de la conservación del suelo (SCS, 1973). Se asumirá, igualmente para todos los casos y con el objetivo de no tomar por referencia valores que puedan agravar el problema sin estar suficientemente sustentados, que los suelos presentan sustratos favorables, por lo que la tasa máxima de pérdida tolerable de suelo se asumirá en los 6.7 Mg ha⁻¹ año⁻¹ (SCS, 1973).

Resulta importante indicar previamente que han sido medidos un menor número de casos con desarrollo de regueros confinados, catorce, frente a los veintinueve casos con desarrollo de regueros dendríticos caracterizados y cuantificados. Esto es un reflejo directo de la respuesta erosiva de los campos de cultivo ante las precipitaciones y los modelos de manejo. Sobre los campos erosionados se desarrollan muchos más modelos erosivos con morfologías dendríticas de canales que confinados, ambas directamente relacionadas con las direcciones de labor que se han llevado a cabo sobre los campos, como se ha venido indicando.

Además, al número de casos cuantificados con desarrollo de regueros confinados, catorce, hay que añadir las laderas agrícolas sin desarrollo de regueros que fueron caracterizadas bajo los mismos episodios de precipitación que habían producido desarrollo de regueros y cárcavas efímeras en las laderas contiguas, hasta un total de cinco (Ay1-4, Mo1-3, Horm-3, Zorreras-3 y Valde-2). En estos casos, la rugosidad orientada, dirección de labor, fue a favor de la máxima pendiente en todos ellos, lo que indica que potencialmente podrían haber desarrollado morfologías confinadas si el flujo hubiese superado el esfuerzo cortante necesario para arrancar y transportar partículas (Benito et al., 1993, en De Santisteban, 2003). Por lo tanto, estas cinco microcuencas serán consideradas dentro de los casos con morfologías confinadas para abordar la discusión. Cabe destacar que en dos de los tres casos (Zorreras-3 y Valde-2) el episodio de precipitación desencadenante de la erosión en las laderas contiguas fue extremo, mientras en los otros tres casos (Ay1-4, Mo1-3 y Horm-3) la erosión en las microcuencas circundantes se produjo bajo un temporal de varios días de duración y bajas intensidades de precipitación.

La figura 5.48 incluye los valores de tasa de erosión anual equivalente (en adelante TEAE) correspondientes a todos los casos estudiados, hasta cuarenta y tres, con excepción de aquellas microcuencas sobre las que no se desarrollaron regueros, hasta cinco, que no han sido incluidos en la figura, si bien si serán consideradas en la discusión posterior. En el gráfico se indica con una línea roja continua el valor de la tasa tolerable de pérdida de suelo considerada (6.7 Mg ha⁻¹ año⁻¹) (SCS, 1973). Igualmente en el gráfico se han diferenciado aquellos casos con desarrollo de redes de regueros confinados y los modelos de erosión que desarrollaron redes dendríticas de regueros, al igual que se han ordenado los casos por orden creciente en el valor calculado de la TEAE.

Como puede observarse en la figura 5.48, en ambas morfologías de regueros existe un buen número de casos que superan la tasa tolerable de pérdida de suelo T, en concreto el 44% del total de los cuarenta y ocho casos estudiados. Por lo tanto, nos encontramos ante episodios

erosivos “no tolerables” en un alto porcentaje, si bien existen notables diferencias en las respuestas erosivas entre las dos morfologías caracterizadas.

Conviene destacar inicialmente que en los casos con desarrollo de regueros confinados las TEAE-s son claramente inferiores. El caso que presenta el valor máximo de TEAE entre aquellos con morfología confinada, Ri-4, presenta un valor máximo de $40 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ frente a los más de $100 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ que presenta el caso de Ri-1, aquel con una mayor TEAE entre aquellos con desarrollo de regueros dendríticos.

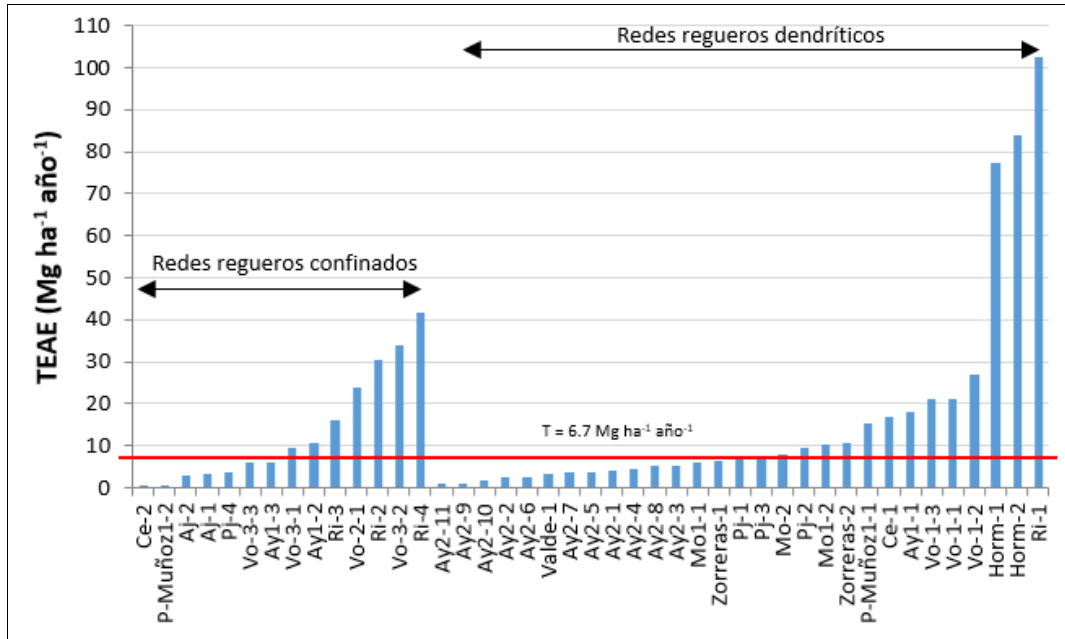


Figura 5.48: Recopilación de los resultados obtenidos a partir de las mediciones de pérdida de suelo realizadas en todas las microcuencas estudiadas, siendo TEAE la tasa de erosión anual equivalente. La línea roja indica el valor de tasa tolerable de pérdida de suelo (T) para un perfil de entre 50 y 100 cm y unas condiciones favorables de suelo (SCS, 1973)

Además, son proporcionalmente más los casos con desarrollo de regueros dendríticos que superan el valor de la tasa T. Entre los episodios erosivos con morfologías dendríticas, el 50% de los casos presentan TEAE-s superiores al valor T umbral, mientras en el caso de las microcuencas con desarrollo de regueros confinados, diecinueve, el número de casos que superan el valor T considerado es algo menor, el 37%.

A este dato hay que añadir que entre los casos con morfologías dendríticas que superan el valor T se sitúan episodios erosivos desencadenados tanto a partir de episodios extremos de precipitación como a partir de precipitaciones con características de temporal de invierno, mientras entre los casos con desarrollo de regueros confinados solo superan el valor T los episodios erosivos desencadenados a partir de episodios extremos de precipitación, con la excepción del caso de Ay1-2.

Desde el punto de vista de la conservación de la productividad del sustrato, Moreira (1991), que es el valor que más debe interesar a aquellos que explotan los suelos, siendo medido el estado de conservación no en parámetros físico-químicos sino en los volúmenes de cosecha obtenida, la gravedad de las tasas de erosión cuantificadas queda aún más contrastada. Desde este punto de vista, el valor de T para un perfil de suelo con profundidades comprendidas entre los 50 y 100 cm se sitúa entre los 1.7 y los $2.5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. En este caso será considerado como valor umbral el de $2.5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ para poder efectuar comparaciones.

La figura 5.49 incluye los valores de TEAE correspondientes a todos los casos estudiados, indicándose, nuevamente, con una línea roja continua el valor de la tasa tolerable de pérdida de suelo considerada, en este caso $2.5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Moreira, 1991). Igualmente se han diferenciado en el gráfico aquellos casos con desarrollo de redes de regueros confinados y los modelos de erosión que desarrollaron redes dendríticas de regueros, al igual que se han ordenado en orden ascendente los valores de TEAE calculados.

Considerando este nuevo umbral, las TEAE-s calculadas lo superan en la totalidad de los casos de estudio con excepción de doce microcuencas del total de cuarenta y ocho caracterizadas. Por lo tanto, en el 75% de los casos la erosión superaría el valor T, o lo que es lo mismo, la erosión sería “no tolerable”.

Igual que en el caso anterior, existen notables diferencias en la respuesta erosiva entre las dos morfologías de regueros diferenciadas. Mientras en el caso de las microcuencas con desarrollo de regueros confinados, diecinueve, el número de casos que superan el valor T considerado es de doce, lo que supone el 63% de los casos; entre los episodios erosivos con morfologías dendríticas, el 86% de los casos presentan TEAE-s superiores al valor T, veinticinco de veintinueve casos.

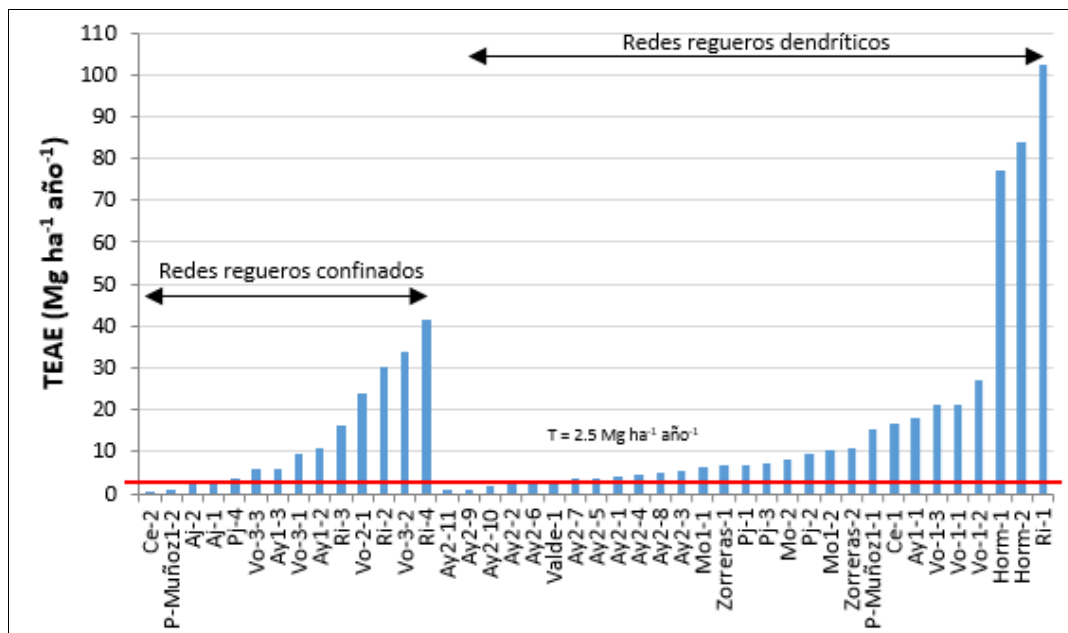


Figura 5.49: Recopilación de los resultados obtenidos a partir de las mediciones de pérdida de suelo realizadas en todas las microcuencas estudiadas, siendo TEAE la tasa de erosión anual equivalente. La línea roja indica el valor de tasa tolerable de pérdida de suelo para un perfil de entre 50 y 100 cm (Moreira, 1991).

A estos datos poco alentadores respecto a la gravedad de los episodios erosivos extremos hay que añadir que en la mayoría de los casos las precipitaciones desencadenantes de la erosión presentaron importantes periodos de retorno. Cuando se califica un episodio erosivo como “no tolerable”, aquel que supera el valor T, la gravedad de esta tasa de erosión no se limita a superar la tasa de formación de suelo en ese año, sino que este efecto se extiende durante los años estimados como periodo de retorno. A modo de ejemplo, las tasas de erosión calculadas en Rielves superaron los valores de T, tanto desde el punto de vista de la conservación (SCS, 1973) como de la productividad agronómica del campo (Moreira, 1991) en los cuatro ejemplos caracterizados y cuantificados. La precipitación que se produjo en agosto de 1995 y cuyo periodo de retorno se estimó en 9 años, produjo una tasa de erosión superior a la tolerable no solo para el año 1995, sino durante todos los años hasta el 2003. A este efecto habría que añadir los

eventos erosivos que, con seguridad, se produjeron sobre los campos estudiados en Rielves durante esos 9 años, que no hicieron sino agravar el problema.

En resumen, los datos presentados en este trabajo revelan una importante y generalizada degradación en los suelos estudiados. Se han medido elevadas intensidades de erosión asociadas al desarrollo de regueros y/o cárcavas efímeras, que, en algunos casos, superan la tolerancia máxima establecida. A su vez, se puede concluir, de forma generalizada, que las tasas de erosión cuantificadas son inferiores sobre las laderas labradas a favor de la máxima pendiente que sobre aquellas labradas oblicuamente o perpendicularmente a la máxima pendiente. Los suelos y cultivos de las áreas seleccionadas para este trabajo son representativos de amplias extensiones de la zona central de España, que se encuentran afectadas por los mismos procesos.

Por otro lado, resulta fundamental determinar la importancia relativa de los efectos de los episodios erosivos extremos, aquellos ligados al desarrollo de cárcavas efímeras y regueros, frente a aquellos episodios erosivos en los cuales las pérdidas de suelo se producen ligadas fundamentalmente a los procesos de erosión difusa (*splash erosion* y *overland flow*). Estos últimos episodios erosivos pueden denominarse como de moderada y baja intensidad. Igualmente se desencadenan ante precipitaciones de moderada y baja intensidad pero, que en este caso, no llegan a saturar el suelo, siendo los coeficientes de escorrentía menores y, con ello, menor la capacidad erosiva de estos eventos de precipitación, no llegando a desarrollarse sistemas de cárcavas y/o regueros.

En las parcelas de erosión instaladas en La Finca Experimental La Higuera (De Alba, 1998; Alcázar, 2013), en condiciones climáticas mediterráneas, fue cuantificada la tasa de erosión asociada a estos episodios erosivos de moderada y baja intensidad. Los valores se obtuvieron a partir de información recogida en parcelas de erosión tipo USLE (22 x 1.5 m) con pendientes del 9%, durante un periodo de 17 campañas agrícolas (1993-1994 a 2009-2010), bajo condiciones de manejo del suelo de laboreo convencional con barbecho blanco, resultando el mismo manejo presente en la mayoría de las microcuencas caracterizadas en este estudio. Igualmente las parcelas fueron labradas a favor de la máxima pendiente, con lo que no se aplicó ninguna técnica para la conservación del suelo sobre las mismas.

Con este tamaño de parcela se registra la pérdida de suelo resultante, fundamentalmente, de procesos de erosión difusa, pudiendo desarrollarse algún reguero de pequeño tamaño. Sin embargo, las parcelas tipo USLE, por sus dimensiones, no permiten el desarrollo de formas erosivas mayores, regueros y cárcavas.

La tasa de erosión media obtenida en La Higuera fue de $3.37 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Alcázar, 2013). En esta serie de datos se observa una gran variabilidad interanual, intrínseca al clima mediterráneo, destacando que en un solo año la tasa de erosión ascendió hasta los $24 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$, mientras que en seis de las campañas agrícolas fue inferior a $1 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$.

Si se considera como representativa de los episodios erosivos de moderada y baja intensidad en condiciones del secano mediterráneo dicha tasa de erosión anual, puede determinarse el porcentaje de las tasas anuales medias de pérdida de suelo correspondiente a la erosión ligada al desarrollo de regueros y/o cárcavas que tiene lugar durante los episodios de erosión extrema. En la tabla 5.38 se presenta la comparación entre las tasas de erosión equivalentes de cada uno de los doce episodios de erosión extrema presentados en este trabajo y la tasa de erosión media obtenida en La Higuera. La suma de ambas tasas se entiende representa el total de la erosión anual, y con ello se pueden determinar los porcentajes correspondientes a los diferentes procesos erosivos.

Tabla 5.38: Importancia relativa de los efectos erosivos de los episodios extremos de erosión cuantificados en este trabajo frente a los episodios erosivos de moderada y baja intensidad representados por las tasas de erosión media obtenida en La Higuera (Alcázar, 2013).

Localización episodio erosivo extremo	Tasa de erosión equivalente (Mg ha ⁻¹ año ⁻¹)	%
Episodio erosivo extremo Arroyomolinos	9.09	72.94
Episodios erosivos de moderada y baja intensidad (La Higuera)	3.37	27.06
Tasa total de erosión	12.45	100
Episodio erosivo extremo Villarrubia de los Ojos	16.08	82.67
Episodios erosivos de moderada y baja intensidad (La Higuera)	3.37	17.33
Tasa total de erosión	19.45	100
Episodio erosivo extremo Paracuellos del Jarama	5.53	62.13
Episodios erosivos de moderada y baja intensidad (La Higuera)	3.37	37.87
Tasa total de erosión	8.90	100
Episodio erosivo extremo Ajalvir	2.49	42.49
Episodios erosivos de moderada y baja intensidad (La Higuera)	3.37	57.51
Tasa total de erosión	5.86	100
Episodio erosivo extremo Rielves	39.02	92.05
Episodios erosivos de moderada y baja intensidad (La Higuera)	3.37	7.95
Tasa total de erosión	42.39	100
Episodio erosivo extremo Cebolla	7.07	67.72
Episodios erosivos de moderada y baja intensidad (La Higuera)	3.37	32.28
Tasa total de erosión	10.44	100
Episodio erosivo extremo Móstoles 1	6.73	66.63
Episodios erosivos de moderada y baja intensidad (La Higuera)	3.37	33.37
Tasa total de erosión	10.10	100
Episodio erosivo extremo Móstoles 2	6.56	66.06
Episodios erosivos de moderada y baja intensidad (La Higuera)	3.37	33.94
Tasa total de erosión	9.93	100
Episodio erosivo extremo Hormigos	65.92	95.14
Episodios erosivos de moderada y baja intensidad (La Higuera)	3.37	4.86
Tasa total de erosión	69.29	100
Episodio erosivo extremo Zorreras	7.06	67.69
Episodios erosivos de moderada y baja intensidad (La Higuera)	3.37	32.31
Tasa total de erosión	10.43	100
Episodio erosivo extremo Valdepeñas	2.75	44.93
Episodios erosivos de moderada y baja intensidad (La Higuera)	3.37	55.07
Tasa total de erosión	6.12	100
Episodio erosivo extremo Pedro Muñoz	6.61	66.23
Episodios erosivos de moderada y baja intensidad (La Higuera)	3.37	33.77
Tasa total de erosión	9.98	100
Porcentaje de las tasas anuales medias de pérdida de suelo correspondiente a la erosión por regueros y/o cárcavas		68.89

Los resultados obtenidos muestran una variabilidad importante, ya que la erosión asociada al desarrollo de regueros y/o cárcavas oscila entre el 42.5 y el 95.1% de la tasa total de erosión anual, relacionado directamente con las diferentes características de la precipitación desencadenante de la erosión. El valor medio es del 68.9%, algo inferior al 80% que ha sido tomado como referencia en este mismo trabajo para el cálculo de la erosión total (Poesen et al., 1997; De Alba, 1998). Pese a ello, con los datos de este trabajo se corrobora que las tasas de erosión asociadas a la erosión por flujos concentrados representan un elevado porcentaje de la erosión total que se produce sobre los campos agrícolas en condiciones climáticas mediterráneas, situándose en este caso en el umbral del 70% del total de la tasa de erosión anual.

Por último, en términos de representatividad de los casos de estudio desarrollados, diversos estudios constatan la importancia de las tasas de erosión por procesos de reguización y/o acaravamiento en campos agrícolas, tanto por los valores absolutos que alcanzan como por los porcentajes de erosión que suponen respecto a la tasa de erosión hídrica total producida.

Existen publicaciones en las que se presentan tasas de erosión asociadas a diferentes episodios erosivos concretos o tasas anuales de pérdida de suelo mediante la monitorización de una serie

de campos de cultivo para obtener los valores anuales de pérdida de suelo, tanto en condiciones climáticas mediterráneas, como en otras áreas climáticas. Todas ellas concluyen subrayando el grave problema de degradación al que están expuestos los suelos, especialmente en las zonas áridas y semiáridas del planeta, otorgando una relevancia especial dentro de los procesos erosivos sobre los suelos agrícolas a un número pequeño de episodios de precipitación a lo largo del año que producen un alto porcentaje de la erosión anual (ver, por ejemplo, González Hidalgo et al., 2005; De Alba et al, 1998).

En la tabla 5.39 se presenta una recopilación bibliográfica de algunos estudios en los que se ha cuantificado la erosión por flujos concentrados en campos de cultivo. Se trata de una pequeña colección de datos que, sin embargo, permiten una primera aproximación a la importancia del fenómeno erosivo por regueros y/o cárcavas y sitúan los episodios erosivos presentados en este trabajo como representativos de la problemática que se aborda.

Entre los trabajos que se citan destacan algunos en ambientes mediterráneos (Casalí, 1997; Nachtergaele et al., 2000*; Martínez Casasnovas et al., 2002; De Santisteban, 2003), así como otros desarrollados en otras regiones climáticas: áreas del cinturón del *loess* en el norte de Europa (Nachtergaele et al., 2001*; Cerdan et al., 2002) o el trabajo de Smith (1993)* en Mississippi (USA) en condiciones climáticas subtropicales sobre cuencas con cultivos de soja.

Un buen número de datos proceden de la cuantificación de las pérdidas de suelo producido por cárcavas efímeras y regueros en campos de cultivo en la zona Sur de Navarra. El clima en esta zona de Navarra, pese a situarse al norte de la Península Ibérica, es equivalente al existente en las áreas donde se sitúan las laderas caracterizadas en este estudio. Se trata de un clima mediterráneo continental con una precipitación media anual entre los 400 y 600 mm (Gobierno de Navarra, 2001 en De Santisteban, 2003), por lo que resultan muy interesantes como valores de comparación.

Si se considera el umbral de pérdida tolerable de suelo máximo, ante la falta de información sobre las características de los suelos: $11.2 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (SCS, 1973); se puede observar como de los setenta y dos casos de estudio presentados en la tabla 5.39, el 68% superan dicho umbral. Valor que no es nada discordante con el obtenido en este mismo trabajo, poniendo de relevancia la problemática existente ante la conservación de los suelos agrícolas. Las conclusiones de todos los trabajos inciden en la idea de la importancia de la erosión por flujos concentrados y la necesidad del conocimiento del proceso erosivo para adoptar las prácticas de conservación más adecuadas.

*: Las tasas de erosión de Smith (1993), Nachtergaele et al., 2000, Nachtergaele et al., 2001a se han tomado de la Tesis Doctoral de De Santisteban (2003), que los cita de esta manera en su trabajo, si bien no se han encontrado estos datos publicados fuera de la Tesis de De Santisteban. En Nachtergaele et al. (2001b) se describen las cuencas hidrológicas de las que se han obtenido los datos.

Tabla 5.39: Tasas de erosión calculadas en campos agrícolas tras diferentes eventos de precipitación.

	Zona de estudio	Fecha	Tasa de erosión por cárcavas y/o regueros (Mg ha ⁻¹)	Referencia bibliográfica
Cuantificación directa de eventos erosivos a escala de ladera agrícola	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	18.04	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	7.48	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	9.37	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	17.31	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	19.89	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	23.61	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	16.28	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	18.44	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	4.38	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	15.16	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	11.43	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	0.54	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	16.24	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	25.81	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	7.26	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	7.55	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	7.49	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	10.37	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	36.92	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	22.90	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	39.36	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	41.49	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	54.89	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	30.06	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	17.74	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	57.87	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	23.27	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	50.17	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	44.99	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	24.03	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	17.83	Nachtergaele et al.,2000
	Alentejo (Portugal)	Marzo 1998	21.85	Nachtergaele et al.,2000
	Murcia	Junio 1998	77.68	Nachtergaele et al.,2000
	Murcia	Junio 1998	17.21	Nachtergaele et al.,2000
	Murcia	Junio 1998	60.21	Nachtergaele et al.,2000
	Murcia	Junio 1998	76.60	Nachtergaele et al.,2000
	Murcia	Junio 1998	6.21	Nachtergaele et al.,2000
	Murcia	Junio 1998	2.47	Nachtergaele et al.,2000
	Murcia	Junio 1998	56.25	Nachtergaele et al.,2000
	Murcia	Junio 1998	73.51	Nachtergaele et al.,2000

Cuantificación directa de eventos erosivos a escala de ladera agrícola	Zona de estudio	Fecha	Tasa de erosión por cárcavas y/o regueros (Mg ha ⁻¹)	Referencia bibliográfica
	Murcia	Junio 1998	52.55	Nachtergaele et al.,2000
	Murcia	Junio 1998	6.73	Nachtergaele et al.,2000
	Flandes (Bélgica)	Mayo 1997	32.33	Nachtergaele et al.,2001a
	Flandes (Bélgica)	Mayo 1997	15.25	Nachtergaele et al.,2001a
	Flandes (Bélgica)	Mayo 1997	21.68	Nachtergaele et al.,2001a
	Flandes (Bélgica)	Mayo 1997	64.19	Nachtergaele et al.,2001a
	Flandes (Bélgica)	Mayo 1997	17.52	Nachtergaele et al.,2001a
	Flandes (Bélgica)	Junio 1998	8.31	Nachtergaele et al.,2001a
	Flandes (Bélgica)	Junio 1998	12.77	Nachtergaele et al.,2001a
	Flandes (Bélgica)	Junio 1998	18.41	Nachtergaele et al.,2001a
	Flandes (Bélgica)	Junio 1998	19.62	Nachtergaele et al.,2001a
	Blosseville (Normandie)	Diciembre 1999	10	Cerdan et al., 2002
	Blosseville (Normandie)	Mayo 2000	0.8	Cerdan et al., 2002
	AltPenedès-Anoia (Catalunya)	Junio 2000	207	Martínez Casanovas et al, 2002
	Pitillas (Navarra)	Septiembre 1999	15.18	De Santisteban, 2003
	Pitillas (Navarra)	Septiembre 1999	14.24	De Santisteban, 2003
	Pitillas (Navarra)	Septiembre 1999	12.4	De Santisteban, 2003
	Pitillas (Navarra)	Septiembre 2000	2.3	De Santisteban, 2003
	Pitillas (Navarra)	Octubre 2001	11.2	De Santisteban, 2003
Pitillas (Navarra)	Septiembre 1999	12.5	De Santisteban, 2003	
San Martin de Unx (Navarra)	Junio 2000	3.8	De Santisteban, 2003	
San Martin de Unx (Navarra)	Octubre 2001	3.3	De Santisteban, 2003	
	Zona de estudio	Periodo	Tasa de erosión anual	Referencia bibliográfica
Cuantificación directa de una serie temporal a escala de ladera agrícola	Mississippi (USA)	1993	38.12	Smith, 1993
	Mississippi (USA)	1993	14.60	Smith, 1993
	Mississippi (USA)	1993	10.64	Smith, 1993
	Pitillas (Navarra)	1994-1995	3.8	Casalí, 1997
	Pitillas (Navarra)	1995-1996	8.2	Casalí, 1997
	Pitillas (Navarra)	1995-1996	15.4	Casalí, 1997
	Pitillas (Navarra)	1995-1996	8.46	Casalí, 1997
	Pitillas (Navarra)	1995-1996	1.56	Casalí, 1997
	Pitillas (Navarra)	1997-1998	13.9	De Santisteban, 2003
	Pitillas (Navarra)	1997-1998	40.74	De Santisteban, 2003

En este contexto se observa que los episodios erosivos extremos, aquellos con desarrollo de regueros y/o cárcavas, deben ser considerados claves a la hora de evaluar la eficacia de las distintas alternativas de prácticas agronómicas y planes de conservación del suelo, como son el caso de todas aquellas incluidas en los reglamentos derivados de la PAC que, junto al barbecho blanco, indica el laboreo en contorno como una práctica obligatoria para la conservación del suelo. Sin embargo, los datos evidencian, que pese a que en un buen número de casos las tasas de erosión no son tolerables, los valores allí donde se desarrollan redes confinadas de regueros, íntimamente ligadas al laboreo a favor de la máxima pendiente, son menores que en los casos en que se desarrollan redes dendríticas, ligadas a direcciones de labor oblicuas o a laboreo en contorno. Incluso existiendo ejemplos en que directamente no se desarrollan morfologías canaliformes allí donde se ha seguido una dirección de labor a favor de la máxima pendiente. Por lo tanto, se observa una tendencia en que la labranza a nivel (labranza en contorno) se ha revelado como una práctica que, no solo no es efectiva para controlar la erosión hídrica en los campos de agricultura extensiva de secano en condiciones climáticas mediterráneas, sino que esta práctica llega a intensificar los efectos erosivos que tienen lugar en episodios extremos de erosión.

5.4 Conclusiones

Los suelos y cultivos de las áreas seleccionadas para este trabajo son representativos de amplias extensiones localizadas en la zona central de España que pueden verse afectadas por estos mismos procesos sobre suelos que, al igual que en las áreas concretas del estudio, se caractericen por presentar sustratos desfavorables agronómicamente y estar fuertemente degradados por la erosión.

Se han medido elevadas intensidades de erosión por flujos concentrados, que en casi el 50% de los casos superan las tasas de pérdidas tolerables de suelo desde un punto de vista de la conservación el suelo, es decir, presentan tasas de erosión anuales equivalentes superiores a los $6.7 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Más destacable aun, desde el punto de vista de la productividad del suelo las tasas de erosión no tolerables alcanzan el 75% de los casos de estudio, tasas de erosión anual equivalentes superiores a los $2.5 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$. Las altas intensidades de erosión encontradas en este trabajo se ven ratificadas por los resultados de trabajos previos en las mismas condiciones climáticas mediterráneas, así como en otras condiciones climáticas.

Los resultados obtenidos en este trabajo han revelado que cerca del 70% de las tasas anuales medias de pérdida de suelo tienen lugar durante episodios erosivos en los cuales se produce desarrollo de flujos concentrados, cárcavas y/o regueros, episodios erosivos que pueden ser clasificados como de erosión extrema.

Se han caracterizado dos modelos erosivos claramente diferenciados vinculados al desarrollo de flujos concentrados: redes de regueros paralelos y confinados en los surcos de labor y redes dendríticas de regueros, directamente ligados a las direcciones de laboreo desarrolladas sobre los diferentes campos de cultivo.

La cuantificación de las tasas de erosión asociadas a ambas morfologías muestra notables diferencias. En los casos con desarrollo de regueros confinados las tasas de erosión son claramente inferiores tanto por los valores absolutos que alcanzan como por los porcentajes de los mismos que superan los valores tolerables de erosión de entre los episodios erosivos estudiados. A este hecho se suma que sobre los campos de cultivo se desarrolla un número mayor de redes dendríticas de regueros frente a las confinadas, vinculado al hecho de que, impulsados por los reglamentos asociados a la PAC, los agricultores labran mayores superficies intentando seguir las curvas de nivel que siguiendo la dirección de la máxima pendiente.

Por otro lado, se han identificado dos situaciones meteorológicas diferentes en las que tiene lugar la mayor parte de la erosión. La primera, corresponde a las tormentas aisladas de elevada intensidad de lluvia, que suelen corresponder a células convectivas de desarrollo vertical típicas del verano mediterráneo. La segunda, se trata de situaciones meteorológicas de temporal, generalmente invernales, en las que se encadenan varios días de lluvia consecutivos que dan lugar a elevadas precipitaciones acumuladas. En ambos casos, el factor clave desencadenante de la erosión es la acumulación y drenaje del agua de escorrentía sobre la superficie del suelo. En el primer caso, porque la intensidad de lluvia es muy superior a la capacidad de infiltración de la capa superficial del suelo; y en el segundo, porque una vez que el perfil de suelo se satura, la infiltración de agua se reduce drásticamente.

Ante los fenómenos meteorológicos identificados como potencialmente peligrosos desde la perspectiva de la conservación del suelo, se puede concluir que en los campos de viñedos y olivares, así como en los campos que se mantienen en barbecho blanco, no se pueden definir periodos de mayor riesgo de erosión a lo largo del año dado que el suelo siempre se encuentra sin cubierta vegetal o con muy poca cubierta, la protección que confieren las cepas al suelo es mínima, algo mayor en el caso de los campos de olivos. Por el contrario, en el caso de suelos destinados a los cultivos herbáceos existe un periodo anual de mayor riesgo de formación de cárcavas efímeras y/o regueros que se circunscribe al fin del otoño y principios del invierno, cuando la humedad del suelo es elevada y el suelo se encuentra sin protección en espera de que crezca el cereal recién sembrado.

De los datos obtenidos puede concluirse que los episodios erosivos extremos deben ser considerados claves a la hora de evaluar la eficacia de las distintas alternativas de prácticas agronómicas y planes de conservación del suelo, como son el caso de todas aquellas incluidas en los reglamentos derivados de la PAC que, junto al barbecho blanco, indica el laboreo en contorno como una práctica obligatoria para la conservación del suelo. Sin embargo, se observa una tendencia por la cual el laboreo en contorno se ha revelado como una práctica que, no solo no es efectiva para controlar la erosión hídrica en los campos de agricultura extensiva de secano en condiciones climáticas mediterráneas, sino que llega a intensificar los efectos erosivos que tienen lugar en episodios extremos de erosión, debido a que ligada a esta práctica, ante precipitaciones desencadenantes de episodios erosivos extremos, la respuesta observada sobre las laderas afectadas es el desarrollo de redes de regueros de morfologías dendríticas que producen tasas de erosión superiores a las redes de regueros paralelos y confinados en los surcos de labor. Por tanto, debe cuestionarse fuertemente el laboreo en contorno como práctica de conservación del suelo, al menos en condiciones climáticas mediterráneas.

**6. PRECISIÓN Y EFICIENCIA DE DIFERENTES
PROPUESTAS METODOLÓGICAS PARA
LA MEDICIÓN EN CAMPO DE LA
EROSIÓN POR REGUEROS Y/O
CÁRCAVAS EFÍMERAS**

6.1. Introducción y objetivos

En la primera parte de este estudio se ha llevado a cabo la caracterización y cuantificación de la erosión producida tras diferentes eventos de precipitación en cuarenta y tres microcuencas agrícolas mediante los siguientes métodos:

- a) En las laderas que presentaban redes de regueros con morfología dendrítica se ha aplicado el denominado como Método de la Nube de Puntos.
- b) En las redes de regueros confinados en los surcos de labranza se ha aplicado el Método de los Transectos equidistantes.

Durante el trabajo de campo en las redes de regueros dendríticas, y especialmente en aquellas que presentaron mayor complejidad y desarrollo, fueron detectadas una serie de limitaciones, esencialmente temporales, a la hora de la adquisición de los datos.

La inversión temporal necesaria para una completa caracterización de la erosión del suelo aplicando el Método de la Nube de Puntos sobre las redes de regueros dendríticas choca, en las microcuencas con desarrollos más complejos de la red de regueros, con la imposibilidad, en muchos casos, de disponer de las laderas agrícolas a estudiar por periodos de tiempo prolongados. Esta limitación temporal suele producirse por la “necesidad” del agricultor de eliminar los rasgos de erosión aparecidos labrando el suelo, como el ejemplo sucedido en Rielves (Ri-1).

De la experiencia del trabajo en campo se ha estimado que la velocidad media de toma de datos aplicando el Método de la Nube de Puntos, en condiciones favorables, es decir sin limitación de recursos humanos y en condiciones meteorológicas y de suelo favorables, es de 200 secciones transversales por cada media jornada de trabajo, considerando una media jornada de trabajo de 5 horas*. Por tanto, a modo de ejemplo, una ladera con rasgos de erosión cuya caracterización requiera de la medición de 1000 secciones transversales, necesitaría, en el mejor de los casos, de 2 días y medio de trabajo en condiciones favorables, verano, y hasta casi 5 días en invierno, con condiciones limitadas de luminosidad. Se excluye de este cálculo la caracterización general de la ladera agrícola de estudio: levantamiento topográfico y delimitación de la microcuenca hidrológica, que habrá de desarrollarse de la misma manera independientemente del método que se utilice para la caracterización de la red de regueros.

La necesidad de una importante inversión temporal para la caracterización de algunas de las redes de regueros, aquellas más complejas, limita la posibilidad de cartografiar un mayor número de redes de regueros desarrolladas por un mismo evento de precipitación, lo que a su vez limita, en el corto plazo, la posibilidad de realizar una base de datos lo más extensa posible que asocie los episodios de precipitación y sus efectos erosivos y que permita la determinación de su representatividad.

**Se toma media jornada de trabajo como unidad de tiempo de referencia porque en invierno la tarde resulta muy reducida y resulta imposible desarrollar jornadas completas de trabajo. Tomando media jornada como referencia se permite una comparativa más directa sin necesidad de considerar la época del año en que se desarrolle la campaña de campo. Por tanto, considerando de media 200 secciones transversales cada 5 horas de trabajo, se está considerando una velocidad media de toma de datos de 1 sección cada minuto y medio, lo cual supone una buena velocidad de toma de datos en campo.*

Ante estos antecedentes, se ha detectado la necesidad de implementar protocolos de campo alternativos, en ciertas circunstancias, al Método de la Nube de Puntos que permitan conjugar eficiencia y precisión: una toma de datos lo más rápida posible unida a un error razonable y conocido. El conocimiento de los errores introducidos en cada propuesta resulta una de las necesidades básicas para la validación de las mismas. No se pretende llegar a una alternativa única, sino adecuar los métodos empleados a las diferentes circunstancias existentes.

Las medidas directas en campo resultan las más precisas, simples y económicamente menos costosas respecto a otros métodos que, además, requieren de algún tipo de medida directa para su validación, y los métodos basados en la medida de un número de secciones transversales a lo largo de los canales han sido, y siguen siendo, los más comúnmente usados (ver 4.2.2.).

Sin embargo, una u otra distribución espacial de las secciones transversales a lo largo de las redes de regueros, buscando reducir el número de secciones transversales a tomar, puede optimizar la inversión temporal necesaria para la caracterización de una red de regueros.

El Método de la Nube de Puntos (MNP) será el de referencia -metodología 0- por considerarlo el más preciso de los aplicados en el trabajo de campo (su desarrollo puede verse en el apartado 4.2.2.1.). Las alternativas que se propondrán a continuación surgen de aplicar el método de los transectos equidistantes, aquel utilizado para los casos de los regueros confinados (su desarrollo puede verse en el apartado 4.2.2.2.), sobre las redes de regueros dendríticos, con diferentes variaciones.

Aplicar el método de los transectos equidistantes permite la sistematización de la toma de datos, eliminando la subjetividad inherente al MNP. A ello se une que, si se aplica el método de los transectos tal y como se ha venido aplicando para las redes de regueros confinados, no sería necesario cartografiar la totalidad de la red de regueros. Esta forma de cálculo, considerando longitudes equivalentes de la red de regueros, podría suponer un potencial ahorro en el número de medidas a tomar en campo. Sin embargo, es necesario indagar en la influencia que ejerce en el resultado final la consideración o no de la longitud total de la red de regueros, desde el punto de vista del error introducido, al margen del potencial ahorro en el número de medidas a tomar.

Es por ello que, en este capítulo, partiendo de la aplicación del Método de los Transectos equidistantes sobre las redes de regueros dendríticas, se han abordado dos alternativas:

- a) Una aproximación a las longitudes de los regueros, asumiendo que la longitud de los canales entre dos transectos consecutivos es igual a la distancia entre transectos, que ha sido denominado como el método de las longitudes equivalentes, en adelante Le. Se trata del método utilizado hasta el momento sobre las redes de regueros confinados.
- b) Considerar la longitud total de todos los regueros situados entre dos transectos consecutivos, método que se ha denominado como de las longitudes totales, en adelante Lt.

Si se quiere considerar la longitud total de la red de regueros es necesario establecer un procedimiento para obtener dicha longitud. Un levantamiento cartográfico clásico de la red de estudio, toma de coordenadas de una gran cantidad de puntos de la red de regueros, es una posibilidad que requiere de cierta inversión temporal. Con el objetivo de reducir los costes temporales al máximo en campo, se ha planteado la posibilidad de aplicar un método fotogramétrico para realizar reconstrucciones cartográficas de la red de regueros a partir de fotografías oblicuas y un número mínimo de toma de coordenadas de puntos de control distribuidos sobre la ladera.

Por otro lado, la equidistancia entre transectos ha sido estudiada:

- a) En distancia oblicua, distancia sobre la propia ladera: Método de los Transectos equidistantes según Distancias oblicuas (en adelante, MTD).
- b) Según diferencias de cota: Método de los Transectos equidistantes según diferencias de Cota (en adelante, MTC). En este segundo caso los transectos son equivalentes a las curvas de nivel.

En resumen, se plantean cuatro métodos alternativos al método MNP:

- a) Método de los Transectos equidistantes según Distancias oblicuas considerando Longitudes equivalentes (MTD-Le).
- b) Método de los Transectos equidistantes según diferencias de Cota considerando Longitudes equivalentes (MTC-Le).
- c) Método de los Transectos equidistantes según Distancias oblicuas considerando Longitudes totales (MTD-Lt).
- d) Método de los Transectos equidistantes según diferencias de Cota considerando Longitudes totales (MTC-Lt).

Al aplicarse el Método de los Transectos, en cualquiera de las cuatro variantes que han sido descritas, deberá determinarse la influencia en el resultado final de la distancia entre transectos (s) considerada.

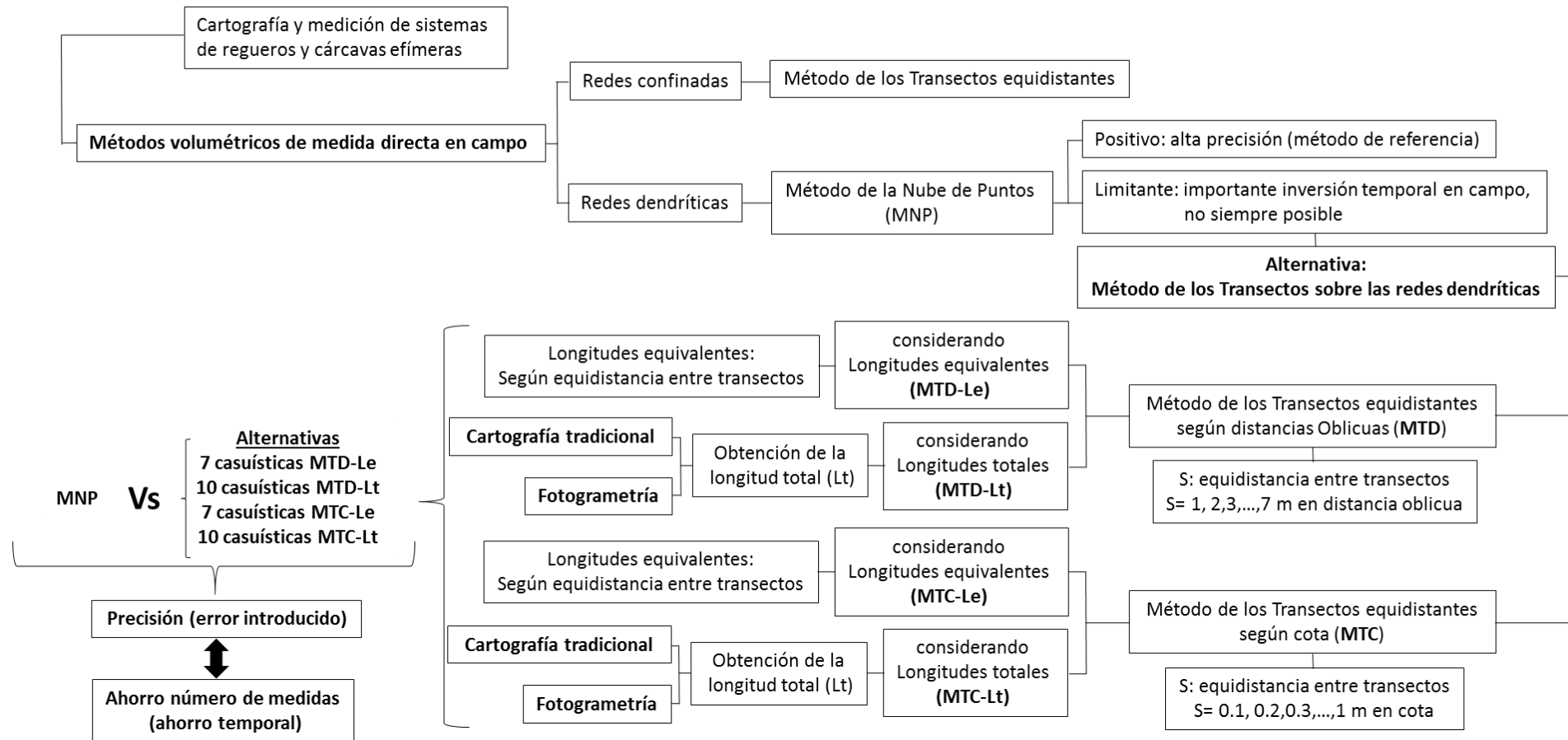
Complementariamente a todas estas propuestas metodológicas de toma de datos en campo, ha sido desarrollado el *software* informático *Rill Morphometer*. El programa ha sido desarrollado con el objeto de realizar el cálculo de los volúmenes de suelo perdido a partir de la información obtenida en campo mediante cualquiera de los métodos propuestos.

En una primera fase experimental el *Rill Morphometer* permite, además, simular los volúmenes de pérdida de suelo que se obtendrían aplicando cualquiera de las cuatro alternativas mediante transectos a partir de los datos de campo que han sido obtenidos utilizando el Método de la Nube de Puntos. Además, el *software* calcula una serie de relaciones entre la morfología de las redes, los volúmenes de suelo perdidos y algunas variables topográficas a lo largo de la ladera. Por tanto, *Rill Morphometer* resulta una herramienta de análisis, al margen del cálculo propio de la pérdida de suelo.

El objetivo general de este capítulo radica en el desarrollo de alternativas a la aplicación del Método de la Nube de Puntos en campo que conjuguen una mejor eficiencia temporal junto a la mayor precisión posible.

En la figura 6.1 (página siguiente) se presenta la estructura general del capítulo:

Precisión y eficiencia de diferentes propuestas metodológicas para la medición en campo de la erosión por regueros y/o cárcavas efímeras



Para la determinación de los errores generados en el cambio de método, así como de los potenciales ahorros temporales han sido utilizadas las redes de regueros con mayor desarrollo de las presentadas en este trabajo, aquellas que requirieron de la medición de más de 200 secciones transversales para su caracterización, lo que supuso una inversión temporal superior a la media jornada. Por lo tanto, del total de las redes de regueros dendríticas que han sido caracterizadas se cuestionará la eficiencia del método MNP en cuatro de ellas: las tres redes dendríticas de Paracuellos del Jarama (Pj-1, Pj-2 y Pj-3) y la red Ay1-1 en Arroyomolinos. A estos cuatro casos se ha añadido el de Ajalvir 1 (Aj-1), que pese a no haber sido considerado como red dendrítica de regueros, sin embargo, en campo se aplicó el MNP para su caracterización y cuantificación del volumen de suelo perdido (tabla 6.1).

Tabla 6.1: Número de secciones transversales que fue necesario medir para caracterizar cada una de las redes de regueros aplicando el método MNP. Se han resaltado en la tabla, subrayándolas, las redes de regueros que requirieron de la medición de más de 200 secciones transversales para su caracterización.

Redes de regueros	Número de secciones transversales MNP	Redes de regueros	Número de secciones transversales MNP
<u>Aj-1</u>	<u>1274</u>	Ay2-1	23
<u>Pj-1</u>	<u>567</u>	Ay2-2	25
<u>Pj-2</u>	<u>634</u>	Ay2-3	172
<u>Pj-3</u>	<u>927</u>	Ay2-4	119
Vo1-1	90	Ay2-5	15
Vo1-2	186	Ay2-6	49
Vo1-3	166	Ay2-7	64
Mo-1	65	Ay2-8	69
Mo2-1	47	Ay2-9	25
Mo2-2	34	Ay2-10	30
<u>Ay1-1</u>	<u>371</u>	Ay2-11	18

6.2. Software Rill Morphometer

El software informático *Rill Morphometer*, cuya primera versión fue desarrollada en 2007 dentro del proyecto MANERO (influencia de los sistemas de manejo agrícola sobre los efectos erosivos de episodios extremos de lluvia) (ref. AGL2004-00650 del Plan Nacional de I+D+I 2004-07 (MEC) y que permitía, ya en su origen, la determinación del volumen de suelo perdido y de las correspondientes tasas de erosión dentro de una microcuenca, así como la obtención de gran cantidad de información referida tanto a la red de regueros como a la topografía de la microcuenca, ha sido evolucionado desde su diseño original, a lo largo de este trabajo con objeto de:

En una primera fase,

- 1- Permitir determinar la precisión de los cuatro métodos alternativos a partir de transectos partiendo de los valores obtenidos en el campo mediante la aplicación del método MNP (simulación de la aplicación de los métodos alternativos en campo), así como calcular el número de medidas potenciales que se requerirían en campo para la aplicación de cada uno de los métodos alternativos.

En una segunda fase,

- 2- Cuantificar el volumen de suelo perdido a partir de las medidas directas en campo aplicando cualquiera de los métodos de toma de datos en campo.
- 3- Analizar la variabilidad espacial de la erosión en regueros y su relación con las variables topográficas de la ladera de estudio.

En relación a este tercer objetivo, el *Rill Morphometer*, además de proporcionar los resultados de erosión total producida en una microcuenca, está programado para ofrecer una serie de características topográficas de la microcuenca de estudio y de la morfología de las redes de regueros, así como la evolución de la pérdida de suelo a lo largo de la ladera. Para ello el programa divide el perfil de la ladera en intervalos, bien en función de distancias oblicuas (en 3D), bien en función de diferencias de cota, según se determine (figura 6.2).

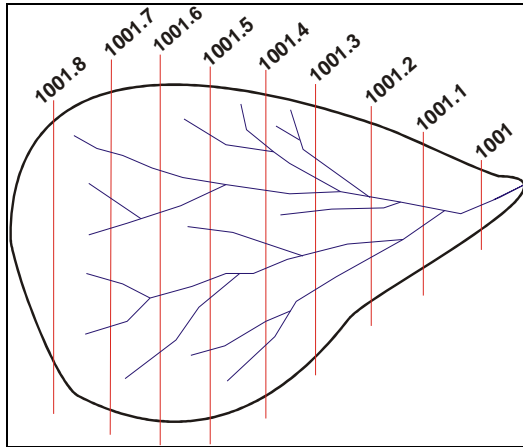


Figura 6.2: Esquema, a modo de ejemplo simple, de los diferentes intervalos considerados por el *Rill Morphometer*. En este caso las diferentes equidistancias de los transectos se habrían calculado según diferencias de cota de 0.1 m sobre una ladera morfológicamente plana, de ahí la forma rectilínea de los diferentes transectos, equivalentes a las curvas de nivel.

Para cada uno de los intervalos seleccionados *Rill Morphometer* ofrece datos de superficie, de pendiente, de volumen parcial de suelo perdido y de tasas de erosión parciales, así como de la variabilidad del número de canales a lo largo del perfil longitudinal de la microcuenca, de las confluencias existentes, así como de la distancia a la divisoria superior de aguas de aparición de los regueros, de las densidades de drenaje y de la evolución de las secciones medias de los canales.

Por lo tanto, *Rill Morphometer* resulta una herramienta completa de análisis, al margen del cálculo propio de la pérdida de suelo, de utilidad indudable aplicada a cualquiera que sea el método de toma de datos para la caracterización de las laderas de estudio y de las redes de erosión.

En los anexos de la Tesis se incluye una descripción mas detallada del *software*, así como el propio programa.

6.3. Métodos alternativos propuestos

Los diferentes métodos propuestos han sido aplicados sobre la reconstrucción tridimensional (3D) de las cinco redes de regueros seleccionadas. Las reconstrucciones 3D se han elaborado a partir de los datos obtenidos del levantamiento topográfico de detalle y de la toma de secciones transversales realizadas mediante el Método de la Nube de Puntos. Todo el procedimiento de cálculo ha sido realizado sobre reconstrucciones 3D ante la imposibilidad de aplicar los distintos métodos sobre una misma red de regueros en campo, dado que la toma de datos conlleva una cierta alteración de la superficie del suelo que produciría diferencias en las medidas sucesivas.

Los métodos alternativos al de la nube de puntos (MNP) que aquí se presentan tienen como denominador común la utilización de transectos para la sistematización de la toma de datos. El modelo general, en cualquiera de sus variantes, propone la medida sistemática de las secciones transversales de los canales en aquellos puntos en que los transectos intersectan a cada uno de los regueros. La totalidad de los transectos se trazan tomando como referencia el situado a inferior cota, que se ubicará teniendo como referencia el reguero que tiene su base a una cota menor, al cual deberá intersectar (figura 6.3).

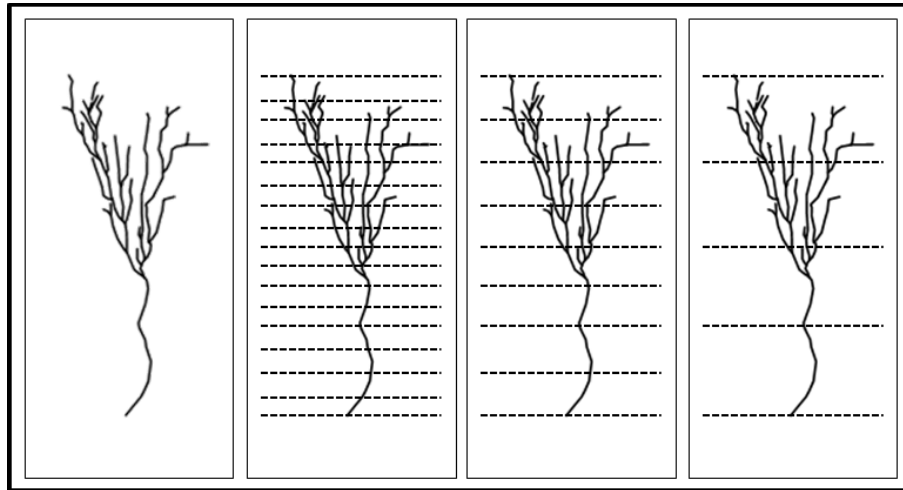


Figura 6.3: Red de regueros (izquierda) y la misma red con el trazo superpuesto de los transectos equidistantes (derecha). El ejemplo escogido es el de la red Ay2-3 y las equidistancias entre transectos son de 2, 4 y 8 m en distancia oblicua.

A continuación se describen los cuatro métodos alternativos al Método de la Nube de Puntos.

6.3.1. Método de los Transectos equidistantes según Distancias oblicuas (MTD)

Como su propio nombre indica, este método se desarrolla a partir del trazado de una serie de transectos paralelos entre sí, perpendiculares a la dirección predominante de la red de regueros y equidistantes oblicuamente (distancia 3D) entre sí según distancias predeterminadas (figura 6.3).

La aplicación del MTD se ha planteado con dos variables para el cálculo del volumen final de pérdida de suelo: a) considerando longitudes equivalentes (MTD-Le) y considerando la longitud total (MTD-Lt) de la red de regueros.

En ambos casos, el cálculo para la cubicación de la pérdida de suelo se realiza para cada una de las superficies existentes entre dos transectos consecutivos, para posteriormente sumar la totalidad de los resultados parciales y obtener el volumen total de suelo perdido.

6.3.1.1. Método MTD considerando longitudes equivalentes de la red de regueros (MTD-Le)

Con este método se evita la cartografía de toda la red de regueros, cuya longitud se aproximará a partir de las equidistancias existentes entre transectos. Se presuponen canales aproximadamente rectilíneos cuya longitud se asume equivalente a la existente entre los dos transectos que lo delimitan. El cálculo del volumen de suelo perdido se realiza simulando la existencia de un canal único entre transectos. La sección de dicho canal único se obtiene de la suma de todas las secciones transversales de los regueros que son intersectados por cada uno de los transectos (figura 6.4). Posteriormente, conociendo la superficie de dos secciones consecutivas del canal único se asigna como longitud del canal la distancia entre transectos, para obtener el volumen final de pérdida de suelo de la superficie delimitada entre los dos transectos considerados.

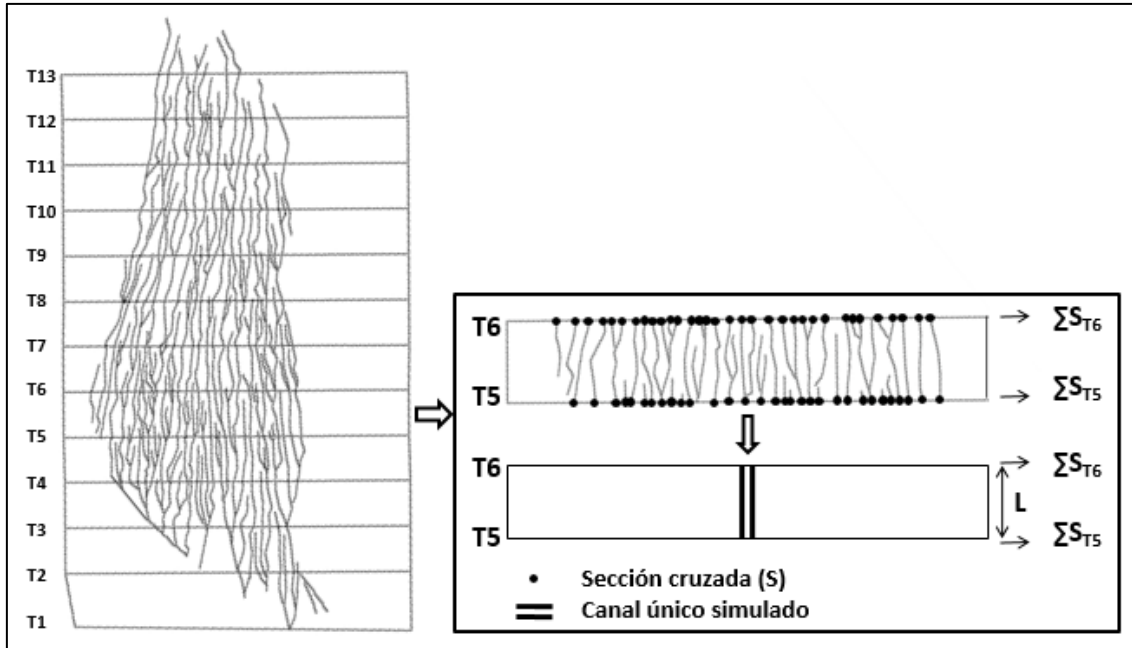


Figura 6.4: Red de regueros con el trazo superpuesto de los transectos (izquierda) y ejemplo de toma de secciones transversales y de elementos necesarios para el cálculo de volumen perdido de suelo aplicando el MTD-Le.

El volumen total de suelo perdido se obtiene por adicción de todos los volúmenes parciales entre transectos (eq. 6.1).

$$V_T = \sum V_S = (\sum S_{Ti} + \sum S_{Ti+1})/2 * L \quad (\text{eq. 6.1})$$

Siendo V_S : volumen de suelo perdido correspondiente a la superficie entre dos transectos consecutivos; S_{Ti} : secciones del transecto i ; L : longitud entre dos transectos consecutivos; V_T : Volumen total de suelo perdido.

El algoritmo de cálculo es el mismo al aplicado en los casos de redes de regueros confinados en los surcos de labranza (ver apartado 4.2.2.).

6.3.1.2. Método MTD considerando longitudes totales de la red de regueros (MTD-Lt)

En este caso, el cálculo para la cubicación de la pérdida de suelo se realiza multiplicando: i) la sección media, de las secciones totales, de dos transectos consecutivos por ii) la longitud total de los canales existentes sobre dicha superficie de cálculo (figura 6.5). Como en el caso anterior, el volumen total se obtiene a partir del sumatorio de cada uno de los subtramos (eq. 6.2).

$$V_T = \sum V_S = ((\sum S_{Ti}/n_i) + (\sum S_{Ti+1}/n_{i+1}))/2 * L_T \quad (\text{eq. 6.2})$$

Siendo V_S : volumen de suelo perdido correspondiente a la superficie entre dos transectos consecutivos; S_{Ti} : secciones del transecto i ; n_i : número de secciones existentes en el transecto i ; L_T : longitud de regueros entre dos transectos consecutivos; V_T : Volumen total de suelo perdido.

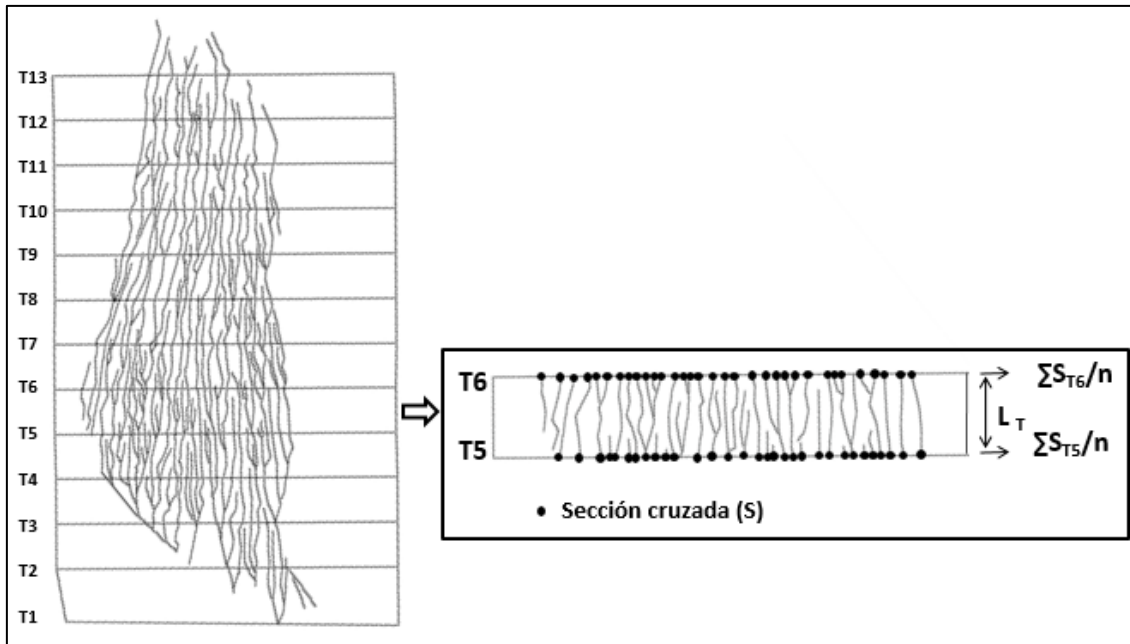


Figura 6.5: Red de regueros con el trazo superpuesto de los transectos (izquierda) y ejemplo de toma de secciones transversales y de elementos necesarios para el cálculo de volumen perdido de suelo aplicando el MTD-Lt.

6.3.2. Método de los Transectos equidistantes según diferencias de Cota (MTC)

Se trata de una variante del método anterior (apartado 6.3.1.). En este caso, los transectos se sitúan equidistantes no en función de la distancia oblicua entre transectos consecutivos sino en función de la cota, con lo que los transectos quedan dispuestos paralelos a las curvas de nivel.

Esta variación tiene como objetivo tomar un mayor número de medidas en los tramos de ladera de mayor pendiente, ya que será en estos lugares donde, con este método, los transectos se encuentren más próximos, en relación tanto con las distancias oblicua (3D) como planares. Las zonas de mayor pendiente de una ladera resultan las de mayor interés dado que van a ser los tramos donde se desarrolle una mayor capacidad erosiva por parte del agua.

En el caso de los transectos equidistantes en función de la cota han sido propuestas las mismas dos alternativas para la cubicación del suelo perdido: considerando una longitud equivalente de la red de regueros (L_e) y considerando la longitud total de la red de regueros (L_t).

6.3.2.1. Método MTC considerando longitudes equivalentes de la red de regueros (MTC- L_e)

El método es el mismo que el desarrollado en el apartado 6.3.1.1., estando la diferencia en la ubicación sobre la ladera de los transectos para la toma de las secciones transversales. Aquí, en cada caso la equidistancia en cota entre transectos consecutivos se transforma en la distancia oblicua (3D) media entre cada par de transectos a la hora de cubicar el volumen de pérdida de suelo. Por tanto, el algoritmo de cálculo es el mismo que en el caso 6.3.1.1. (eq. 6.1), si bien en cada una de las franjas delimitadas por dos transectos consecutivos la distancia oblicua entre ellos se ve corregida debido a que se encuentra influenciada por la pendiente local de la ladera.

6.3.2.2. Método MTC considerando longitudes totales de la red de regueros (MTC-Lt)

Se aplica el mismo método que el desarrollado en el apartado 6.3.1.2., estando la diferencia en la ubicación sobre la ladera de los transectos de referencia para la toma de las secciones transversales. En este caso se incluirán en el cálculo las longitudes totales de la red de regueros. Por tanto, el volumen total de pérdida de suelo se obtendría a partir del procedimiento de cálculo expresado en eq. 6.2.

6.4. Determinación de la precisión y del potencial ahorro temporal de los métodos alternativos propuestos

La precisión de cada uno de los métodos alternativos se determinará en función del porcentaje de error introducido en el volumen de suelo perdido respecto al método MNP. Para ello ha sido calculado el error relativo y absoluto (eq. 6.3 y 6.4) definido respecto al método de referencia (MNP) de cada una de las casuísticas propuestas (todas las posibles combinaciones entre los cuatro métodos alternativos y todas las distancias entre transectos consideradas aplicadas sobre las cinco redes de regueros seleccionadas).

$$E_m^r = (V_m - V_{ref} / V_{ref}) * 100 \quad (\text{eq. 6.3})$$

$$|E_m^r| = |(V_m - V_{ref} / V_{ref})| * 100 \quad (\text{eq. 6.4})$$

Siendo: E_m^r : Medida del error relativo asociado a la distancia (m) en %; V_m : Volumen de suelo erosionado calculado para la separación entre transectos m; V_{ref} : Volumen de suelo erosionado calculado con el método de referencia, en este caso la nube de puntos.

A la hora de determinar el potencial ahorro temporal se ha realizado una comparativa entre el número de secciones transversales que deben tomarse para aplicar cada una de las casuísticas alternativas propuestas y el número de secciones transversales que se midieron al aplicar el MNP (eq. 6.5).

$$D_m = (S_m * 100 / S_{ref}) - 100 \quad (\text{eq. 6.5})$$

Siendo: D_m : Diferencia en % entre el número de secciones transversales tomadas aplicando el método de referencia y las tomadas aplicando el método alternativo asociado a la distancia entre transectos(m); S_m : Número de secciones transversales calculadas para la separación entre transectos m; S_{ref} : Número de secciones transversales tomadas con el método de referencia, en este caso la nube de puntos.

Cabe recordar, que en cualquiera de los métodos de transectos equidistantes, al número de secciones transversales que serán medidas debe sumarse la toma de los puntos de los extremos de cada uno de los transectos que se tracen sobre la ladera.

A partir de la aplicación de los cálculos anteriormente descritos se han obtenido los errores relativos y absolutos y las diferencias entre el número de secciones transversales a medir (potenciales ahorros temporales) asociados a los cuatro métodos alternativos propuestos, para las cinco microcuencas seleccionadas, y para la totalidad de combinaciones de distancias entre transectos (s) consideradas.

La determinación de las equidistancias máximas a considerar resulta arbitraria. Por ello se decidió, en el caso de los Métodos de los Transectos equidistantes según Distancias oblicuas (MTD), realizar inicialmente los cálculos para equidistancias máximas entre transectos de 10 m, con intervalos metro a metro, intervalo máximo que posteriormente podría ser modificado en función de los errores obtenidos.

Para el caso del Método a partir de Transectos equidistantes en función de la Cota (MTC-Le y MTC-Lt) se han considerado para el análisis inicial equidistancias de 0.1 m entre 0.1 y 1.5 m, hasta un total de quince equidistancias diferentes.

La determinación de 1.5 m como equidistancia máxima en cota se realizó porque al trasladar distancias en cota a las equidistancias oblicuas equivalentes sobre las laderas de estudio se obtuvo que el valor medio de los cinco casos de análisis para 1.5 m de distancia en cota se corresponde con 9.89 m en distancia oblicua media, con un valor máximo de la serie de 16.44 m y un valor mínimo de 6.98 m (figura 6.6). Se ha considerado llegar hasta una distancia oblicua media aproximada de 10 m para poder realizar una comparación más o menos equivalente entre métodos.

Posteriormente, tras un análisis preliminar de los resultados obtenidos, se decidió eliminar las equidistancias que ofrecieron errores superiores al 15%, por considerar dicho error como el valor umbral de error admisible, si bien, la determinación del valor umbral de error se realiza arbitrariamente y siempre podrá ser discutida. Por ejemplo, Casalí et al. (2006) consideran que valores superiores al 10% introducen el suficiente error como para que una modificación en la metodología sea cuestionable. En este caso, se ha considerado que incluir casuísticas con errores superiores al 15% únicamente distorsiona el análisis, incluyendo información no necesaria, mientras que limitar dicho valor umbral al 10% limita excesivamente el rango de trabajo propuesto. Por lo tanto, eliminando las equidistancias que aportaron errores superiores al 15% respecto al método MNP, fue limitado el intervalo de análisis hasta una equidistancia máxima de 7 m en distancia oblicua y de 1 m en equidistancia según cota, siendo analizadas un total de 70 casuísticas diferentes, 35 para cada una de las variantes del método MTD, y 100 casuísticas diferentes, 50 para cada una de las variantes del método MTC.

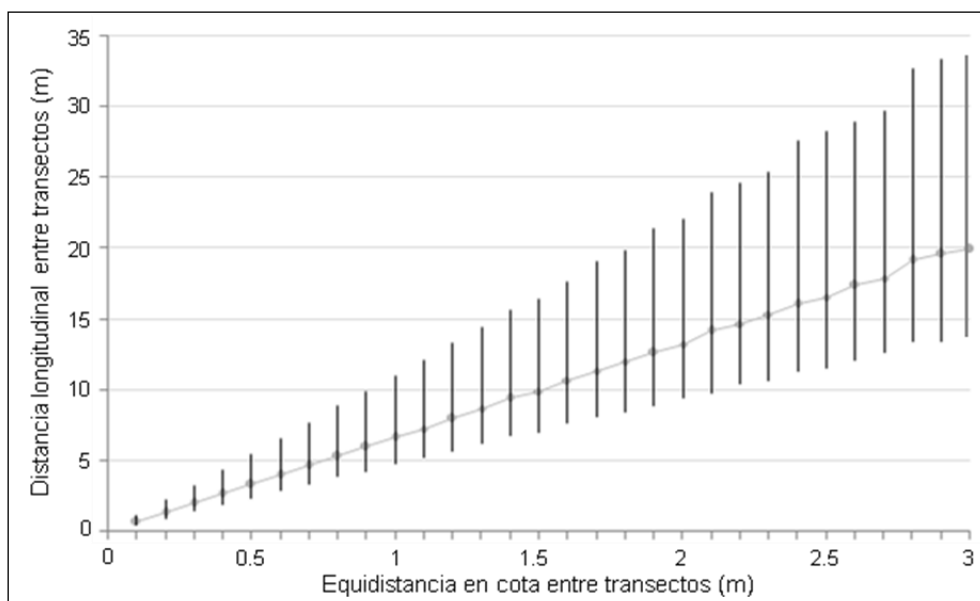


Figura 6.6: Relación entre la equidistancia en cota entre transectos y la correspondiente equidistancia oblicua media. A su vez pueden verse los máximos y mínimos de la serie para cada caso.

Si los diferentes métodos propuestos pueden aplicarse sobre cualquier red de drenaje compleja que se quiera estudiar ofreciendo todos ellos valores máximos de error situados bajo el umbral común de error determinado se podrá concluir que el método o los métodos alternativos son universalizables, considerando que las cinco redes de regueros que han sido calificadas como complejas son una muestra representativa.

En caso de que no se cumpla esta primera condición, se observará si el método pudiera ser aplicable bajo características concretas de alguna de las redes de regueros. Si así fuere, sería necesario determinar bajo qué características.

6.4.1. Método de los Transectos equidistantes según Distancias oblicuas (MTD)

Se presenta el cálculo de error realizado según dos variantes: considerando longitudes equivalentes (L_e) de la red de regueros (1) y considerando la longitud total (L_t) de la red de regueros (2).

6.4.1.1. MTD- L_e : MTD considerando longitudes equivalentes (L_e). Precisión del método: Resultados y discusión

En la tabla 6.2 se muestra que la totalidad de los errores obtenidos, considerando la equidistancia máxima de 7 m, son negativos, lo que indica que el método infraestima la pérdida de suelo. El error absoluto medio de todos los errores calculados es 6.79%, muy próximo al valor de la mediana, 6.9, mientras la desviación estándar se sitúa en 3.39.

Tabla 6.2: Errores relativos obtenidos aplicando el Método MTD- L_e para las cinco redes de regueros consideradas así como los valores de media, mediana y desviación estándar agrupando las siete equidistancias consideradas en el estudio ($n=7$) a partir de los cálculos de error absoluto.

	Pj-1	Pj-2	Pj-3	Aj-1	Ay1-1
1 m	-3.2	-10.4	-3.6	-3.9	-9.1
2 m	-5.2	-9.6	-4.2	-3.3	-9.5
3 m	-4.7	-7.4	-5.5	-2.9	-8.7
4 m	-6.9	-10.3	-6.6	-3.3	-10.7
5 m	-8.1	-11.8	-1.2	-4	-7.1
6 m	-8.2	-6.4	-2.1	-1.5	-12.3
7 m	-9.1	-11.1	-7.2	-4.1	-14.5
Media	6.5	9.6	4.3	3.3	10.3
Mediana	6.9	10.3	4.2	3.3	9.5
Desv. estándar	2.2	2.0	2.2	0.9	2.5

En la tabla 6.2 también se plasman los valores de error absoluto medios, medianas y valores de dispersión para cada una de las cinco redes de regueros analizadas. Todos los valores medios obtenidos se encuentran por debajo del 10%, con la excepción del caso Ay1-1, que tiene su error medio en 10.3%. Los valores menores de error son los de Aj-1, que apenas supera el 4% de error para las equidistancias mayores. También es llamativo que los valores de media y mediana son iguales para el caso de Aj-1, lo cual indica distribuciones simétricas de los errores.

Si se analizan los errores absolutos obtenidos para cada una de las cinco redes de regueros (figura 6.7) puede observarse que no existe una tendencia común entre las cinco redes de regueros estudiadas. Existe una ligera tendencia a ir incrementando el error según aumenta la equidistancia, con las excepciones de Aj-1 y Pj-2. El caso de Aj-1 mantiene muy constante el error para la práctica totalidad de las equidistancias, con errores muy bajos, mientras Pj-2 presenta una mayor irregularidad en los resultados que se sitúan en su mayoría en el umbral o por encima del 10%.

Hasta un 80% de las casuísticas estudiadas ofrecen errores inferiores al 10%, siendo el error máximo obtenido para el total de los casos el 14.5%.

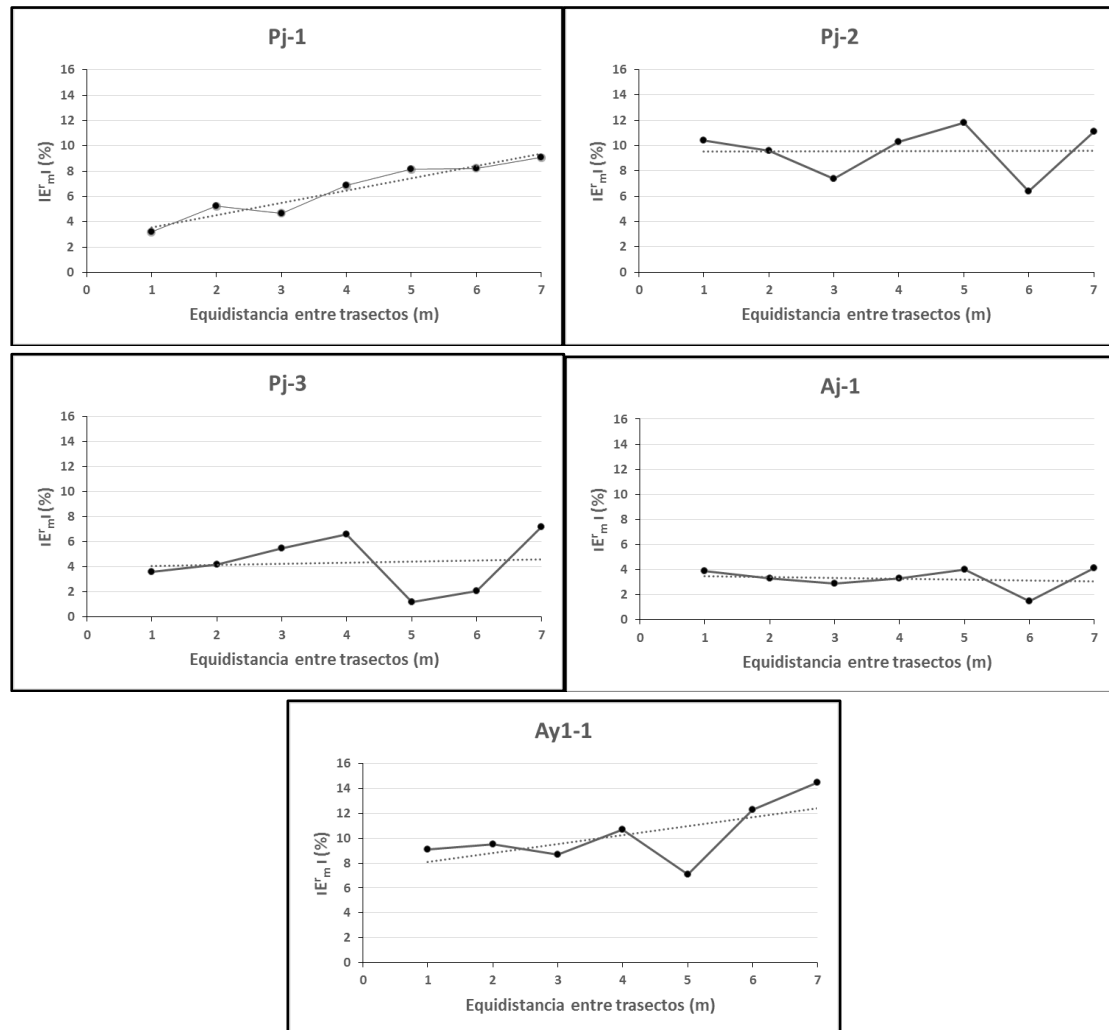


Figura 6.7: Error absoluto (IE_{rm}) en función de la distancia entre transectos adyacentes para cada una de las redes de regueros aplicando el método MTD-Le.

Si se consideran las cinco redes de regueros como una única muestra representativa puede determinarse un único error máximo para cada una de las equidistancias estudiadas. En este caso, puede observarse que el error relativo máximo entre los cinco calculados para cada una de las equidistancias es muy constante (tabla 6.3), con una tendencia a aumentar según aumenta la equidistancia, especialmente en las equidistancias mayores consideradas.

Tabla 6.3: Valor máximo del error relativo entre los calculados para las cinco redes de regueros analizadas y para cada una de las equidistancias consideradas.

Equidistancia	1m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m
Error relativo máximo (%)	-10.4	-9.6	-8.7	-10.7	-11.8	-12.3	-14.5

Ante los resultados observados en la tabla 6.3 se podría establecer un valor umbral de error que se situase en el 14.5%, umbral para el cual se aceptarían la totalidad de las equidistancias analizadas en la aplicación del método. Según se limita la equidistancia máxima considerada, se limita el error máximo. Esta tendencia se rompe en los 3 m de equidistancia.

6.4.1.2. MTD-Lt: MTD considerando longitudes totales (Lt). Precisión del método: Resultados, discusión y conclusiones preliminares

Resulta importante resaltar desde el punto de vista del análisis de la precisión, que el 100% de los errores obtenidos son inferiores al 10%, siendo el error máximo del 8.7%. Por otro lado, el 71.4% de los errores son positivos, por lo que se puede afirmar que el método tiende a sobreestimar los valores de pérdida de suelo respecto al MNP (tabla 6.4). El error absoluto medio para el total de los casos es del 1.74%, siendo el valor de la mediana de la serie 1.3 y la desviación estándar 1.92.

En la tabla 6.4 también se plasman los valores de error absoluto medios, medianas y valores de dispersión para cada una de las cinco redes de regueros analizadas. Llama mucho la atención que los valores medios de error son pequeños o muy pequeños, no superando el 2.6% de error absoluto medio. Es el caso de Aj-1 el que presenta la mejor respuesta comparativa al aplicar el método MTD-Lt, siendo el valor medio del error absoluto de tan solo el 0.9%.

Tabla 6.4: Errores relativos obtenidos aplicando el Método MTD-Lt para las cinco redes de regueros consideradas, así como los valores de media, mediana y desviación estándar agrupando las 7 equidistancias consideradas en el estudio (n=7) a partir de los cálculos de error absoluto.

	Pj-1	Pj-2	Pj-3	Aj-1	Ay1-1
1 m	0.5	0.4	0.4	0.1	0.3
2 m	-0.6	0.6	0.6	0.6	0.1
3 m	2.0	2.9	-1.9	0.8	3.8
4 m	-2.1	1.7	-0.4	0.3	1.9
5 m	-2.8	5.0	-0.5	0.1	8.7
6 m	-0.1	5.5	-0.4	2.8	1.3
7 m	-1.6	2.3	-5.3	1.4	1.3
Media	1.4	2.6	1.4	0.9	2.5
Mediana	1.6	2.3	0.5	0.6	1.3
Desviación estándar	1.0	2.0	1.8	1.0	3.0

Si se analizan los errores absolutos obtenidos para cada una de las cinco redes de regueros (figura 6.8) puede observarse que existe una tendencia creciente, en mayor o menor medida, según aumenta la equidistancia entre transectos.

En general los errores son pequeños, no superándose el 8.7%, y situándose la mayoría de los mismos por debajo del umbral del 5%. Si se analizan los resultados caso a caso, puede indicarse que es Aj-1 el que ofrece menores errores, no superando en este caso el 2.8% para ninguna de las equidistancias. En Ay1-1 es donde se da el mayor error, acercándose a la barrera del 10%. Ay1-1 presenta una cierta tendencia errática entre los valores de error para las diferentes equidistancias, con dientes de sierra acusados en la gráfica de la figura 6.8 y ofreciendo el mayor de los errores calculados para la totalidad de los casos de estudio, 8.7%.

Si se consideran las cinco redes de regueros como una única muestra representativa puede determinarse un único error máximo para cada una de las equidistancias estudiadas. En este caso, puede observarse que el error relativo máximo entre los cinco calculados para cada una de las equidistancias es ligeramente creciente según aumenta la equidistancia entre transectos hasta alcanzar el máximo para 5 m, 8.7%, aunque de una manera irregular, disminuyendo posteriormente para las equidistancias mayores (tabla 6.5).

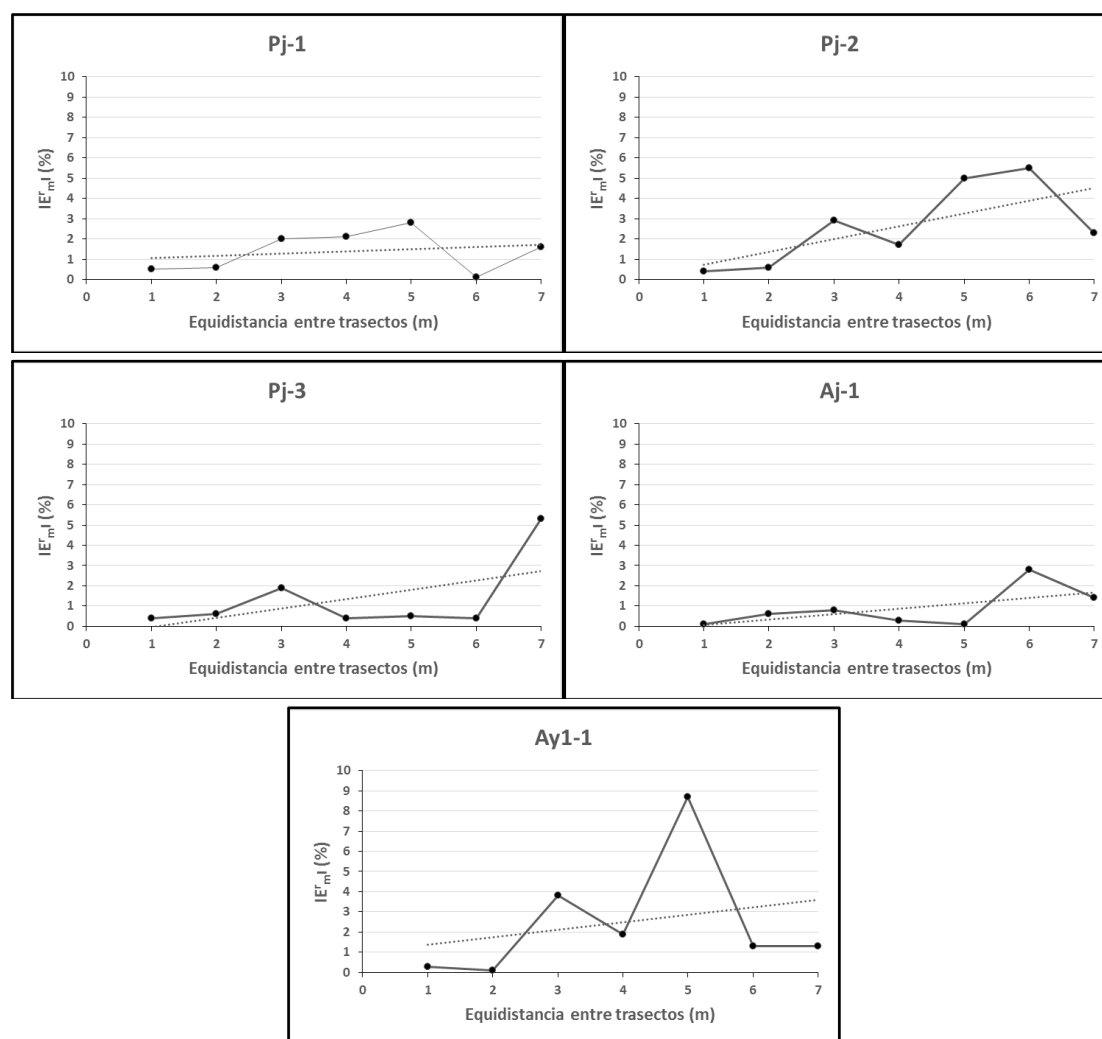


Figura 6.8: Error absoluto (IE_{rml}) en función de la distancia entre transectos adyacentes para cada una de las redes de regueros aplicando el método MTD-Lt.

Tabla 6.5: Valores máximos del error relativo para cada una de las equidistancias consideradas entre las cinco redes de regueros analizadas.

Equidistancia	1m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m
Error relativo máximo (%)	0.5	0.6	3.8	-2.1	8.7	5.5	5.3

A partir de los resultados obtenidos de la aplicación del método MTD-Lt en su comparativa con el método MNP, se podría establecer el 8.7% como valor umbral de error para la utilización del método propuesto aceptando la totalidad de las equidistancias analizadas, hasta 7 m de equidistancia máxima. Si se quisiese reducir dicho umbral de error, podrían eliminarse las equidistancias mayores del análisis, limitando las equidistancias hasta una máxima de 4 m entre transectos, para la cual el valor umbral de error podría reducirse hasta el 3.8%.

6.4.1.3. Ahorro potencial en la medición del número de secciones transversales aplicando el método MTD

De los resultados obtenidos (figura 6.9) destaca que a partir de los 5 m de equidistancia entre transectos se produce ahorro en el número de secciones a medir en las cinco redes de regueros estudiadas, que en el menor de los casos será del 11% (tabla 6.6).

De las cinco redes de regueros, es la de Ajalvir la que aporta un menor ahorro temporal para cada una de las equidistancias (tabla 6.6), no en vano es la más extensa y en la que se requirió medir un mayor número de secciones transversales para su caracterización. En Aj-1 fue

necesario medir hasta 1274 secciones transversales aplicando el MNP, esto indica que si se aplicase el método MTD con equidistancias de 5 m, ahorro del 11.6%, se medirían 206 secciones transversales menos, lo que en términos temporales se ha cuantificado en torno a las 5 horas de trabajo en campo. Si se aplicase el método con equidistancias entre transectos de 7 m, el ahorro sería del 37.6%, lo que equivale a medir en campo 479 secciones transversales menos, casi 12 horas menos de trabajo en campo.

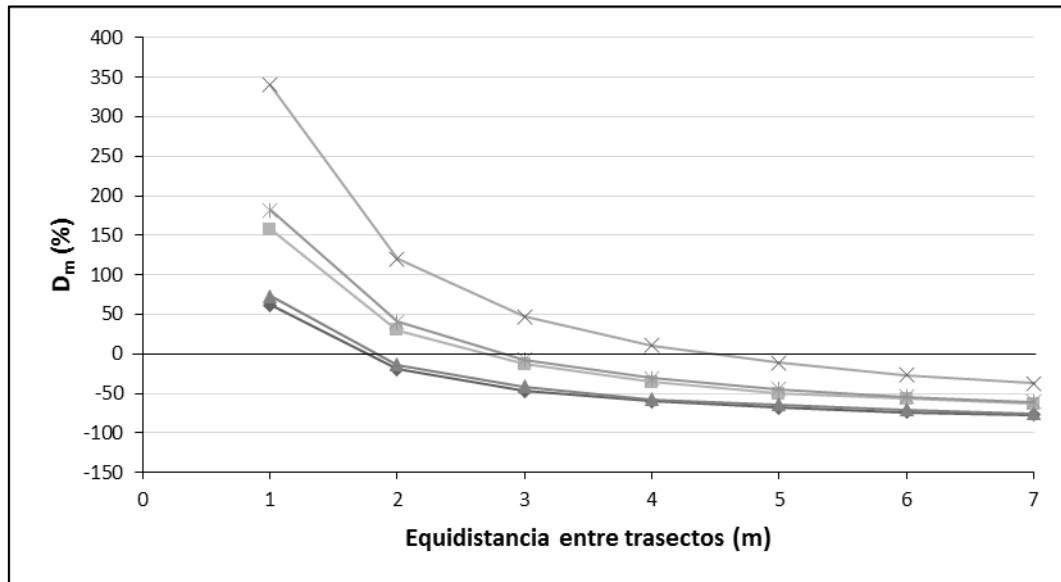


Figura 6.9: Diferencia en % entre el número de secciones transversales tomadas aplicando el método de referencia, MNP, y las tomadas aplicando el método MTD según las diferentes distancias entre transectos (m) considerada para las cinco redes de regueros estudiadas.

Para la equidistancia mayor, 7 m, el ahorro se sitúa entre el 37.6 y el 76.9%, lo cual resulta muy satisfactorio a la hora de impulsar el cambio de método, siempre considerando que este potencial ahorro temporal debe combinarse con la introducción de un error razonable.

Tabla 6: Diferencia en % entre el número de secciones transversales tomadas aplicando el método de referencia, MNP, y las tomadas aplicando el método MTD según las diferentes distancias entre transectos (m) consideradas para las cinco redes de regueros estudiadas.

	Pj-1	Pj-2	Pj-3	Aj-1	Ay1-1
1 m	61.6	157.9	72.9	339.8	181.9
2 m	-19.4	30.4	-13.8	120.3	41.0
3 m	-47.3	-13.2	-41.7	47.5	-7.3
4 m	-59.6	-36.0	-57.2	11.0	-30.5
5 m	-67.9	-50.0	-63.9	-11.6	-44.7
6 m	-73.9	-56.6	-70.8	-26.4	-53.9
7 m	-76.9	-63.1	-75.0	-37.6	-60.9

6.4.2. Método a partir del trazado de Transectos equidistantes según diferencias de Cota (MTC)

Cabe recordar que se han considerado para el análisis equidistancias en cota de 0.1 m entre 0.1 y 1 m. El MTC presenta un cálculo de error según dos variantes: considerando longitudes equivalentes (Le) de la red de regueros que se está estudiando (1) y considerando la longitud total (Lt) de la red de regueros (2).

6.4.2.1. MTC-Le: MTC considerando longitudes equivalentes (Le). Precisión del método: Resultados y discusión

Resulta importante resaltar desde el punto de vista del análisis de la precisión que el 90% de los errores obtenidos son positivos, lo que indica que el método tiene una gran tendencia a sobreestimar la pérdida de suelo (tabla 6.7) respecto al método MNP. El error absoluto medio de todos los casos es del 4.24%, siendo la mediana igual a 3.75 y la desviación estándar del 2.60.

El 98% del total de los errores obtenidos son inferiores al 10%. Tan solo en Ay1-1 para la equidistancia de 0.6 m en cota se alcanza un error superior, el 10.7%. En la tabla 6.7 se plasman los valores de error absoluto medios, medianas y valores de dispersión para cada una de las cinco redes de regueros analizadas. Todos los valores medios obtenidos se encuentran por debajo del 6% de error, siendo el caso de Pj-3 el que presenta un error medio inferior: 2.1%.

Tabla 6.7: Errores relativos obtenidos aplicando el Método MTC-Le para las cinco redes de regueros consideradas, así como los valores de media, mediana y desviación estándar agrupando las 10 equidistancias consideradas en el estudio (n=10) a partir de los cálculos de error absoluto.

	Pj-1	Pj-2	Pj-3	Aj-1	Ay1-1
0.1 m	3.3	4.6	2.4	1.9	9.9
0.2 m	2.8	5.9	2.7	2.9	5.5
0.3 m	4.3	6.1	0.1	2.4	7
0.4 m	-0.1	5.9	-0.6	2.9	6.6
0.5 m	4.9	3.7	1.4	2.5	4.6
0.6 m	6.5	8.7	1.5	3.4	10.7
0.7 m	3.0	0.6	6.2	2.6	3.4
0.8 m	-2.3	7.2	2	3.8	6.4
0.9 m	-4.0	5.8	0.9	5.8	-5.8
1 m	9.6	5.6	3.4	7.5	0.3
Media	4.1	5.4	2.1	3.6	6.0
Mediana	3.7	5.9	1.8	2.9	6.1
Desv. estándar	2.6	2.2	1.7	1.8	3.0

En la figura 6.10 pueden observarse de forma general representaciones gráficas con forma de dientes de sierra que muestran una cierta irregularidad en la distribución de los errores en función de las diferentes equidistancias, si bien dicha irregularidad puede magnificarse en función de la escala, ya que el rango de errores siempre es inferior al 10%. Por lo tanto, no puede determinarse una tendencia común que indique un incremento, disminución o estabilidad del error según aumenta la equidistancia. Excepción a ello es el caso de Aj-1, que presenta una tendencia creciente del error según se incrementa la equidistancia entre transectos. Son Pj-2 y Aj-1 los casos que ofrecen menores errores de las cinco redes de regueros estudiadas.

Si se consideran las cinco redes de regueros como una única muestra representativa puede determinarse un único error máximo para cada una de las equidistancias estudiadas. En este caso, puede observarse que el error relativo máximo entre los cinco calculados para cada una de las equidistancias presenta una evolución irregular según aumenta la equidistancia, situándose en el 10.7% como valor máximo total de la serie, que no se produce para la equidistancia mayor, sino para una equidistancia de 0.6 m en cota (tabla 6.8).

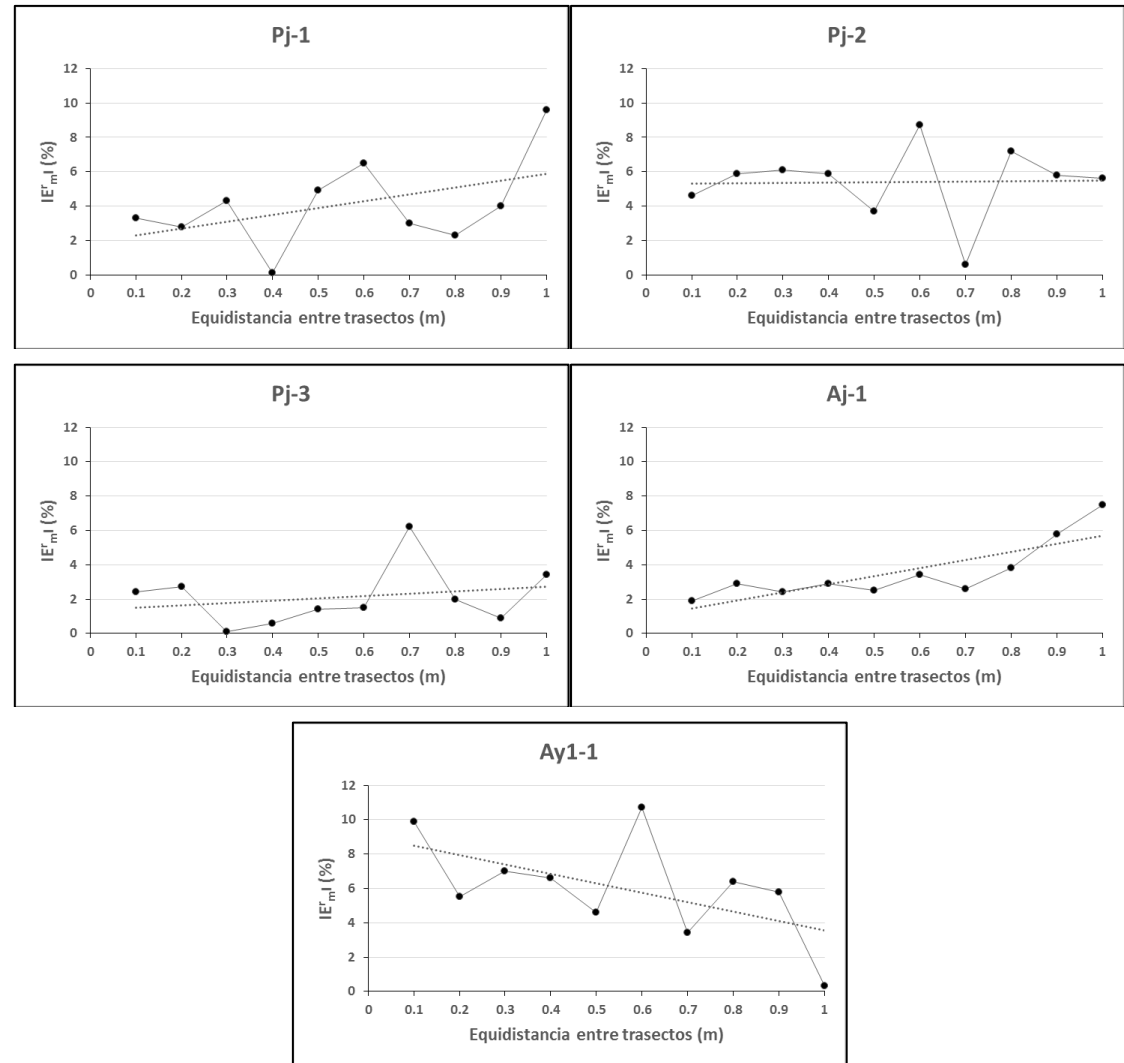


Figura 10: Error absoluto (IE_{rml}) en función de la distancia entre transectos adyacentes para cada una de las redes de regueros aplicando el método MTC-Le.

Tabla 6.8: Valores máximos del error relativo para cada una de las equidistancias consideradas entre las cinco redes de regueros analizadas.

Equidistancia (m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Error relativo máximo (%)	9.9	5.9	7.0	6.6	4.9	10.7	6.2	7.2	5.8	9.6

Ante los resultados observados en la tabla 6.8 se puede establecer que el método MTC-Le introduce un error máximo del 10.7% en comparación con el método MNP para equidistancias máximas entre transectos en cota de 1 m.

6.4.2.2. MTC-Lt: MTC considerando longitudes totales (Lt). Precisión del método: Resultados y discusión

Del análisis de la precisión del último de los métodos alternativos resulta importante resaltar que el 70% de los errores calculados son positivos, lo que indica que el método tiene una cierta tendencia a sobreestimar la pérdida de suelo (tabla 6.9) respecto al método MNP. El error absoluto medio de los 50 casos analizados es del 3.54% de error, siendo la mediana igual a 2.9 y la desviación estándar de 3.16.

En la tabla 6.9 se plasman los valores de error absoluto medios, medianas y valores de dispersión para cada una de las cinco redes de regueros analizadas. Todos los valores medios obtenidos se

encuentran por debajo del 6% de error. Puede observarse que Aj-1 presenta el valor medio más bajo, con tan solo 0.6% de error medio y con el menor de los coeficientes de dispersión, 0.4.

Tabla 6.9: Errores relativos obtenidos aplicando el Método MTC-Lt para las cinco redes de regueros consideradas, así como los valores de media, mediana y desviación estándar agrupando las 10 equidistancias consideradas en el estudio (n=10) a partir de los cálculos de error absoluto.

	Pj-1	Pj-2	Pj-3	Aj-1	Ay1-1
0.1 m	7.5	2.7	3.6	-0.9	3.7
0.2 m	5.7	4	3.5	-0.1	0.2
0.3 m	8.0	3	1.3	-1	-0.4
0.4 m	1.6	4.3	2.8	0.1	4.5
0.5 m	7.6	2.7	2	-1.1	-3.5
0.6 m	9.9	5.4	-0.5	-0.2	3.9
0.7 m	4.6	2.3	5.2	-1	-3.5
0.8 m	0.3	6.3	4.7	-0.9	8.8
0.9 m	0.7	2.4	-1	-0.7	-12.4
1 m	11.6	5.3	-0.2	0.4	-9.2
Media	5.8	3.8	2.5	0.6	5.0
Mediana	6.6	3.5	2.4	0.8	3.8
Desv. estándar	3.9	1.4	1.8	0.4	3.9

Si se analizan los errores relativos obtenidos para cada una de las cinco redes de regueros puede observarse de forma general que existen distribuciones erráticas de los valores según se aumenta la equidistancia entre transectos, lo cual se observa en las gráficas en forma de dientes de sierra que de manera más o menos acentuada se aprecian en la totalidad de los casos (figura 6.11). Este hecho describe una falta de tendencia común entre los cinco casos estudiados, lo que también se observa en las pendientes de las líneas de tendencia, siendo algunas positivas y otras negativas según el caso que se analice. Por otro lado, la característica general es que el 96% de los resultados obtenidos son errores por debajo del 10%, elevándose el error máximo hasta 12.4%, e n el caso de Ay1-1 y para 0.9 m de equidistancia en cota (tabla 6.9).

Es Aj-1 la que ofrece menores errores de las cinco redes de regueros estudiadas. No se supera el 1.1% de error absoluto para ninguna de las equidistancias, presentando una línea de tendencia *quasi* horizontal. En Pj-2 el error también es muy pequeño de forma general. En esta red el error máximo es del 6.3% para una de las equidistancias mayores, 0.8 m, si bien la tendencia es muy errática aunque ligeramente creciente. Tan solo en Pj-1 y Ay1-1 se supera el umbral del 10% de error aunque en casos muy concretos.

Si se consideran las cinco redes de regueros como una única muestra representativa puede determinarse un único error máximo para cada una de las equidistancias estudiadas. En este caso, puede observarse que en general, los valores de error relativo mayores aparecen para las equidistancias más altas, no superando en ningún caso el umbral del 10% hasta los 0.9 m de equidistancia entre transectos, equidistancia para la cual se ha calculado el mayor de los errores, el 12.4% (tabla 6.10).

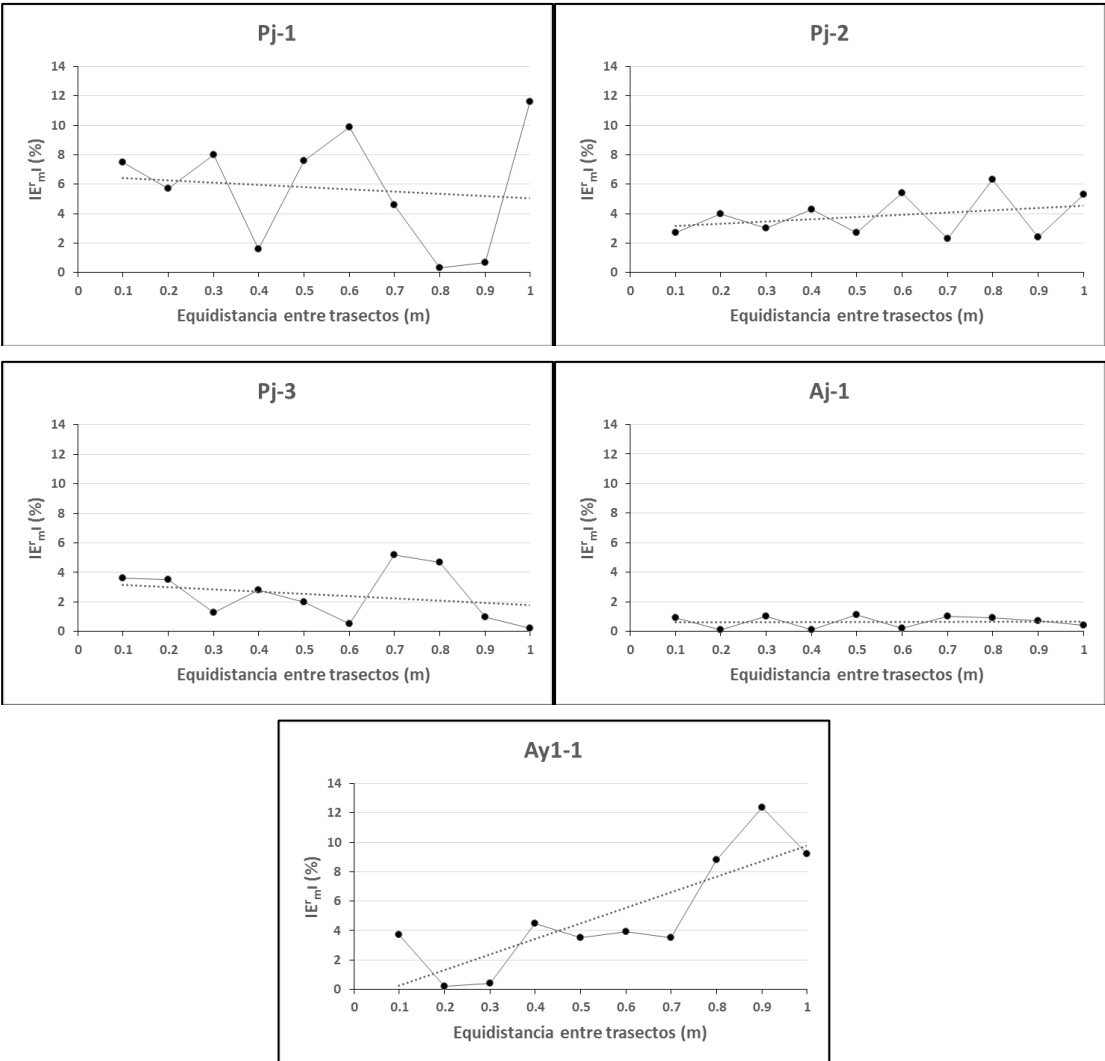


Figura 6.11: Error absoluto (IE_{rml}) en función de la distancia entre transectos adyacentes para cada una de las redes de regueros aplicando el método MTC-Lt.

Tabla 6.10: Valores máximos del error relativo para cada una de las equidistancias consideradas entre las cinco redes de regueros analizadas.

Equidistancia (m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Error relativo máximo (%)	7.5	5.7	8.0	4.5	7.6	9.9	5.2	8.8	-12.4	11.6

Ante los resultados observados se puede establecer el valor del 12.4% de error como umbral de error que incluye la totalidad de las equidistancias estudiadas. Sin embargo, si se reduce la equidistancia máxima hasta los 0.8 m, el valor máximo de error se reduciría considerablemente, situándose en el 9.9%.

6.4.2.3. Ahorro potencial en la medición del número de secciones transversales aplicando el método MTC

De los resultados obtenidos (figura 6.12) destaca que a partir de los 0.6 m de equidistancia entre transectos se produce ahorro en el número de secciones a medir en las cinco redes de regueros estudiadas, que en el menor de los casos será del 0.9% (tabla 6.11).

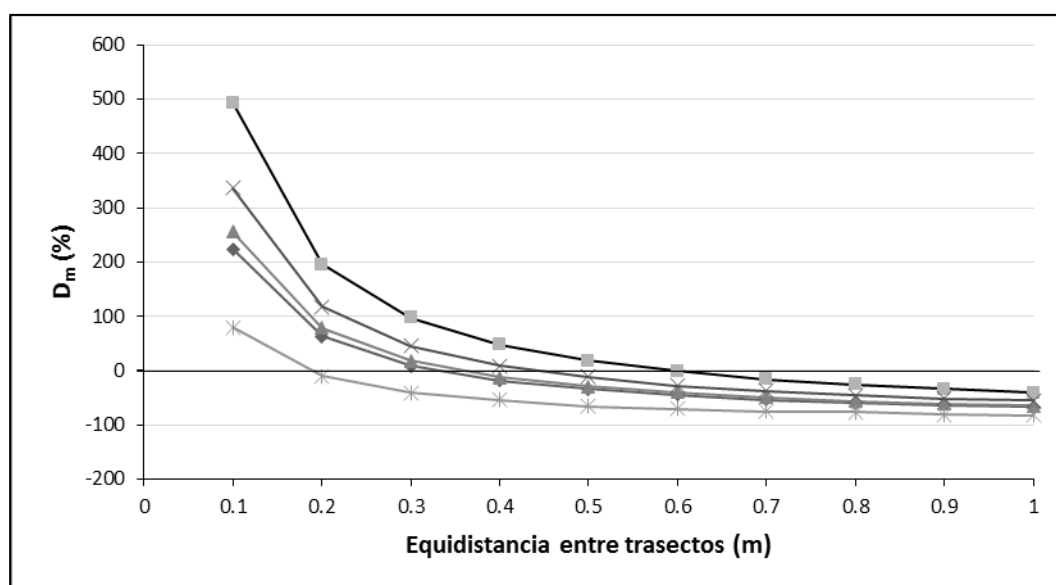


Figura 6.12: Diferencia en % entre el número de secciones transversales tomadas aplicando el método de referencia, MNP, y las tomadas aplicando el método MTC según las diferentes distancias entre transectos(m) considerada para las cinco redes de regueros estudiadas.

De las cinco redes de regueros, es la Pj-2 la que aporta un menor ahorro temporal para cada una de las equidistancias (tabla 6.11). En esta red se produce un ahorro en el número de secciones a medir a partir de los 0.6 m de equidistancia entre transectos apenas perceptible, del 0.9%. En Pj-2 fue necesario medir hasta 634 secciones transversales aplicando el MNP, esto indica que si se aplica el método MTD con equidistancias de 0.6 m, el ahorro sería de apenas 6 secciones transversales. Sin embargo, si se aplicase el método con equidistancias entre transectos de 0.8 m, introduciendo un error máximo del 9.9% en el caso del MTC-Lt y del 10.7% en el caso del MTC-Le, el ahorro sería del 25.6%, lo que equivale a medir en campo 162 secciones transversales menos, lo que significa 4 horas menos de trabajo en campo.

Tabla 6.11: Diferencia en % entre el número de secciones transversales tomadas aplicando el método de referencia, MNP, y las tomadas aplicando el método MTC según las diferentes distancias entre transectos(m)considerada para las cinco redes de regueros estudiadas.

	Pj-1	Pj-2	Pj-3	Aj-1	Ay1-1
0.1 m	224.0	492.9	255.9	336.1	79.8
0.2 m	63.0	195.7	78.2	118.0	-10.0
0.3 m	8.3	97.5	18.0	45.5	-41.0
0.4 m	-18.3	47.9	-12.2	9.0	-53.9
0.5 m	-33.9	17.8	-29.6	-11.9	-65.2
0.6 m	-45.0	-0.9	-39.4	-27.6	-70.9
0.7 m	-54.0	-15.9	-49.1	-37.9	-74.9
0.8 m	-59.4	-25.6	-55.8	-45.2	-76.8
0.9 m	-63.7	-33.8	-60.5	-51.6	-80.6
1 m	-66.5	-41.0	-64.1	-55.6	-82.5

Para la equidistancia mayor, 1 m, el ahorro se sitúa entre el 41 y el 82.2%, lo cual resulta muy satisfactorio a la hora de impulsar el cambio de método, siempre considerando que este potencial ahorro temporal debe combinarse con la introducción de un error razonable.

6.4.3. Discusión general

Para la determinación de los errores a considerar en el cambio de método va a ser considerada una hipótesis pesimista, situándose siempre el error en la situación más desfavorable, esto es, considerando los errores máximos calculados. De esta manera, teniendo en cuenta las cinco

redes de regueros como una única muestra representativa, será determinado el error del método como aquel que nunca es superado para el rango de equidistancias consideradas.

Se puede considerar un valor umbral de error que incluya la totalidad de las equidistancias estudiadas y la totalidad de los métodos alternativos, sin cuestionar la eficacia de la utilización de dichas equidistancias o se puede cuestionar la elección adecuada de las equidistancias establecidas y determinar de esa manera la influencia de la separación entre transectos en la precisión de los resultados de pérdida de suelo obtenidos para cada uno de los métodos alternativos.

Si se busca validar la totalidad de los métodos propuestos sin cuestionar las equidistancias analizadas es necesario situar el umbral de error en el mayor de los valores de error obtenidos, en este caso el 14.5%, ya que este es el error que se introduce aplicando el método MTD-Le para una equidistancia de 7 m entre transectos.

Con el análisis de los resultados anteriormente expuestos, elevar el umbral de error hasta el 14.5% no parece razonable, observando que fue realizada una primera selección de equidistancias determinando como umbral de error máximo el del 15% y conociendo que en términos generales los errores no superan el 10%, e incluso son sensiblemente inferiores a dicho valor (tabla 6.12). Esta información lleva a cuestionar la totalidad de las equidistancias consideradas hasta el momento para cada uno de los métodos alternativos.

Tabla 6.12: Valores máximos del error relativo para cada una de las equidistancias consideradas entre las cinco redes de regueros analizadas aplicando los métodos, de arriba abajo, MTD-Le, MTD-Lt, MTC-Le y MTC-Lt.

MTD-Le							
Equidistancia	1m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m
Error relativo máximo (%)	-10.4	-9.6	-8.7	-10.7	-11.8	-12.3	-14.5

MTD-Lt							
Equidistancia	1m	2 m	3 m	4 m	5 m	6 m	7 m
Error relativo máximo (%)	0.5	0.6	3.8	-2.1	8.7	5.5	-5.3

MTC-Le										
Equidistancia (m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Error relativo máximo (%)	9.9	5.9	7.0	6.6	4.9	10.7	6.2	7.2	5.8	9.6

MTC-Lt										
Equidistancia (m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Error relativo máximo (%)	7.5	5.7	8.0	4.5	7.6	9.9	5.2	8.8	-12.4	11.6

Por otro lado, habrá de considerarse la influencia de incluir en el método la longitud total de la red de regueros o longitudes equivalentes de la red en el resultado final.

6.4.3.1. Determinación de la influencia de la separación entre transectos en la precisión de los resultados de pérdida de suelo

En las figuras 6.11 y 6.12 se presentan los errores absolutos máximos para cada uno de los cuatro métodos propuestos en función de las equidistancias medidas en distancias oblicuas, MTD, o en función de las equidistancias consideradas en diferencia de cota, MTC.

En la alternativa MTD (figura 6.11) se observan una tendencia al incremento del error según se aumenta la equidistancia considerada, así como dos respuestas claramente diferenciadas entre las dos variantes del método, aquella que considera las longitudes totales de los reguero para el cálculo (MTD-Lt) y la que considera longitudes equivalentes (MTD-Le), no superándose en ningún caso un error del 8.7% para la primera de las variantes y llegando hasta el 14.5% para la segunda de ellas.

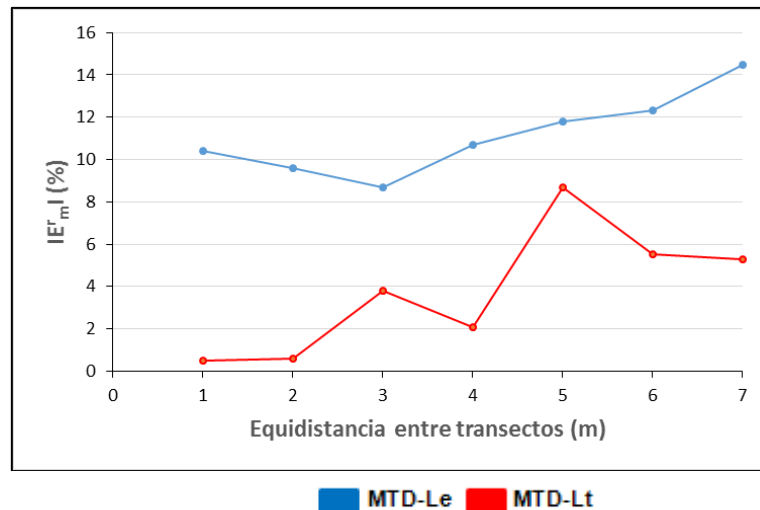


Figura 6.11: Valores máximos del error absoluto de los dos métodos de transectos equidistantes según distancias oblicuas (MTD) en función de las equidistancias entre transectos consideradas, 1 a 7 m.

Si se quiere limitar el umbral de error por debajo del 14.5%, habrá de limitarse la equidistancia máxima entre transectos a considerar en el caso del método MTD-Le. En este caso, para ninguna de las equidistancias el umbral de error puede situarse por debajo del 10%, ya que incluso si se limitasen las equidistancias a, exclusivamente, 1 m entre transectos, el error introducido se eleva hasta el 10.4%.

Para la alternativa MTC (figura 6.12) se observan dos respuestas difícilmente diferenciables, en las cuales no se supera para ninguna equidistancia el error del 12.4%. Se trata de evoluciones erráticas del valor del error en función de la equidistancia, que se visualizan en la forma de dientes de sierra mostrada por la gráfica y en la superposición de las dos líneas. El error máximo para la alternativa MTC-Le es del 10.7% para la equidistancia de 0.6 m en cota. Para la alternativa MTC-Lt dicho error se eleva hasta el 12.4% para la equidistancia 0.9 m.

Aplicando el método MTC-Le, si se quiere limitar el umbral de error por debajo del 10.7%, habrá de limitarse la equidistancia máxima entre transectos a considerar hasta los 0.5 m en cota, en cuyo caso el umbral de error máximo se situaría en el 9.9%. En todo caso, el error mínimo que se introduciría al aplicar el método MTC-Le sería del 9.9%, ya que es el error calculado para la equidistancia mínima en cota, 0.1 m.

En el caso del método MTC-Lt, considerar la equidistancia máxima de 1 m supone asumir un error en la aplicación del método del 12.4%. Limitar la equidistancia máxima a considerar hasta 0.8 m, situaría el umbral de error máximo en el 9.9%.

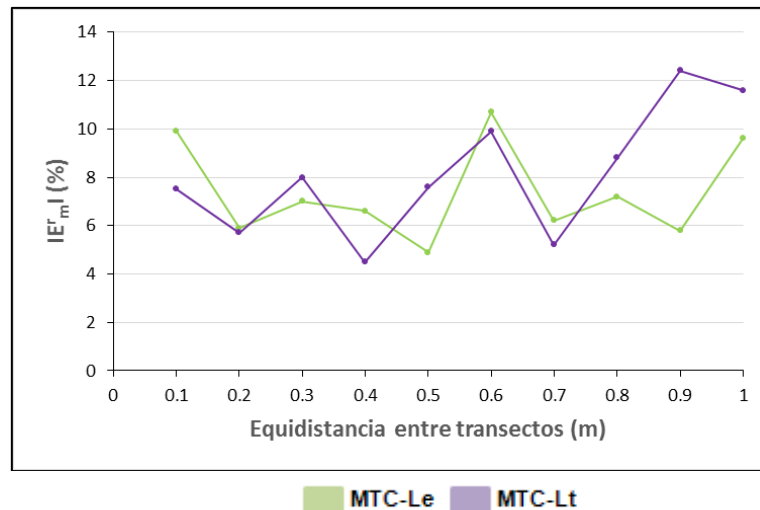


Figura 6.12: Valores máximos del error absoluto de los dos métodos de transectos equidistantes según cota (MTC) en función de las equidistancias entre transectos consideradas, 0.1 a 1 m.

En resumen, en función de las equidistancias máximas consideradas el valor de error puede variar, conociendo siempre que los errores máximos introducidos en la aplicación de los métodos alternativos son del 14.5, 8.7, 10.7 y 12.4% para las equidistancias mayores consideradas aplicando los métodos MTD-Le, MTD-Lt, MTC-Le y MTC-Lt, respectivamente. Que equidistancia máxima considerar deberá discutirse junto al ahorro potencial que supone la utilización de unas u otras equidistancias, porque limitar la aplicación de un método a una equidistancia concreta que conlleve que no se produzca ningún ahorro en el número de secciones transversales a tomar, incluso aunque se redujese a la mínima expresión el error introducido en el cambio de método, obviaría el objetivo principal de este capítulo.

6.4.3.2. Influencia en la precisión de los resultados obtenidos de la utilización de longitudes totales o longitudes equivalentes

En el apartado anterior, 6.4.3.1., ya se ha realizado una primera aproximación sobre la cuestión. Las figuras 6.11 y 6.12 muestran claramente que si se considera la longitud total de la red de regueros aplicando el método MTD, el error es sensiblemente inferior respecto a la consideración de las longitudes equivalentes para el cálculo de los volúmenes de suelo perdido para la totalidad de las equidistancias estudiadas, mientras esta diferenciación no se produce de una manera tan clara si se aplica el método MTC para el cálculo del volumen de suelo perdido.

Analizando la totalidad de los valores de error obtenidos se observa que aplicado el método MTD, de las 35 casuísticas desarrolladas en 33 (94% del total) los errores obtenidos respecto al MNP son menores si se considera en los cálculos la longitud total de la red de regueros (tabla 6.13), mientras que aplicando el método MTC, de las 50 casuísticas analizadas en 31 (62% del total) el error es menor al considerar la longitud total de la red de regueros aplicando el método alternativo (tabla 6.13).

Por lo tanto, en una primera aproximación, en el caso de aplicar el método MTD la consideración de las longitudes totales de la red de regueros resulta en un error menor respecto al método MNP, que habrá posteriormente que calibrar, mientras con el método MTC no se evidencia una tendencia inicial en favor de la consideración de las longitudes totales de la red.

Tabla 6.13: Diferencia de errores absolutos entre las dos alternativas a cada uno de los métodos MTD y MTC: considerando la longitud equivalente de la red de regueros (L_e) y considerando la longitud total de la misma (L_t). Si el resultado es positivo la alternativa L_t ofrece un error menor que la alternativa L_e respecto al MNP. En la columna MTD Pj-1 se ofrece un ejemplo global del cálculo, en el resto de las columnas se ofrecen directamente la diferencia entre los resultados obtenidos. Dif: diferencia entre alternativas.

MTD								MTC					
Pj-1			Pj-2 Dif.	Pj-3 Dif.	Aj-1 Dif.	Ay1-1 Dif.		Pj-1 Dif.	Pj-2 Dif.	Pj-3 Dif.	Aj-1 Dif.	Ay1-1 Dif.	
IE _r ml	MTD-Le	MTD-Lt											Dif.
1 m	3.2	0.5	2.7	10.0	3.2	3.8	8.8	0.1 m	-4.2	1.9	-1.2	1.0	6.2
2 m	5.2	0.6	4.7	9.0	3.6	2.7	9.4	0.2 m	-2.9	1.9	-0.8	2.8	5.3
3 m	4.7	2.0	2.7	4.5	3.6	2.1	4.9	0.3 m	-3.8	3.1	-1.2	1.4	6.6
4 m	6.9	2.1	4.8	8.6	6.2	3.0	8.8	0.4 m	-1.6	1.6	-2.2	2.8	2.1
5 m	8.1	2.8	5.4	6.8	0.7	3.9	-1.6	0.5 m	-2.7	1.0	-0.6	1.4	1.1
6 m	8.2	0.1	8.1	0.9	1.7	-1.3	11.0	0.6 m	-3.5	3.3	1.0	3.2	6.8
7 m	9.1	1.6	7.5	8.8	1.9	2.7	13.2	0.7 m	-1.7	-1.7	1.0	1.6	-0.1
								0.8 m	2.0	0.9	-2.7	2.9	-2.4
								0.9 m	3.3	3.4	-0.1	5.1	-6.6
								1 m	-2.0	0.3	3.2	7.1	-8.9

Haciendo una comparación directa de los errores absolutos obtenidos aplicando las alternativas L_e y L_t a los dos métodos, MTD y MTC (figura 6.13), se observan más claramente las tendencias anteriormente apuntadas.

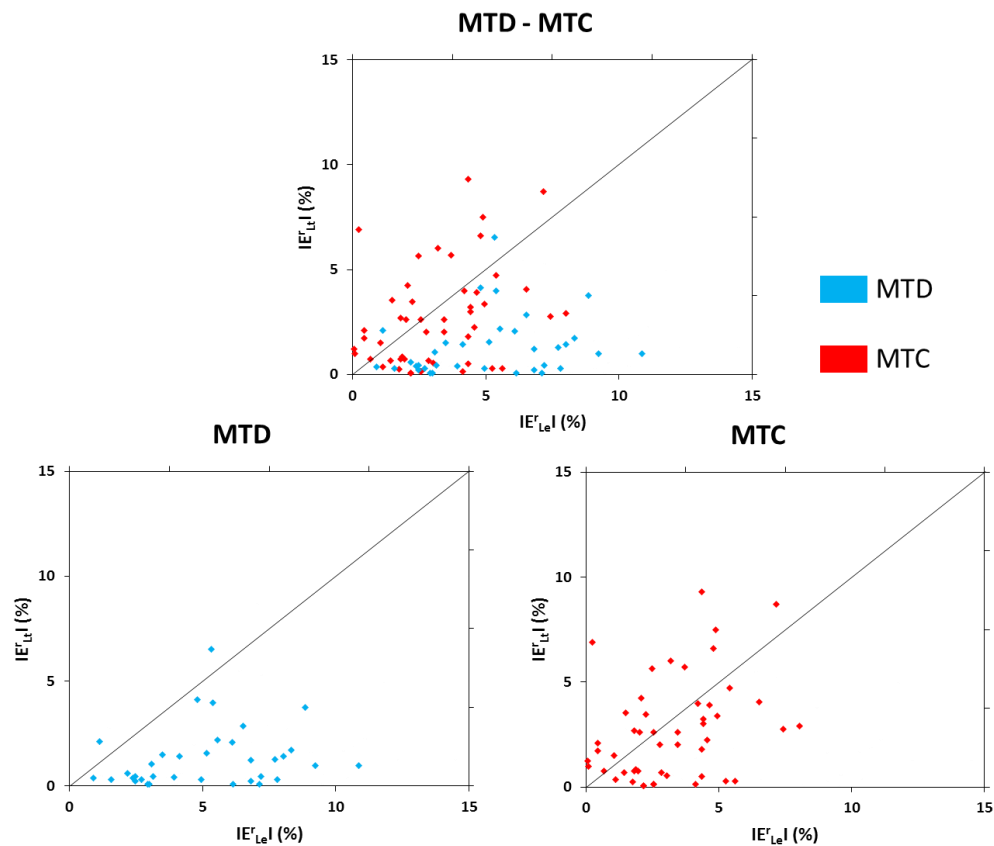


Figura 6.13: Arriba: Comparativa de errores absolutos obtenidos considerando la longitud equivalente de la red de regueros (L_e , eje x) y considerando la longitud total (L_t , eje y) aplicando los dos métodos (MTD y MTC). Debajo: Desglose de los resultados superiores según el método aplicado.

Los resultados obtenidos aplicando el método MTD (que aparecen con puntos azules) se sitúan mayoritariamente bajo la bisectriz y además se sitúan próximos al eje X, produciéndose una elongación de la nube de puntos en la dirección del eje X. Por lo tanto, los errores aplicando la alternativa Lt son menores que los derivados de la alternativa Le. Por otro lado, aplicando el método MTC, los resultados obtenidos, en la figura 6.13 en color rojo, presentan una mayor dispersión y la nube de puntos se elonga en la dirección de la bisectriz. Además, el número de puntos bajo la bisectriz y sobre la misma es similar, de datos anteriores se sabe que en torno al 62% de los resultados se sitúan bajo la bisectriz (tabla 6.13). Por lo tanto, aplicando el método MTC no existe una gran influencia en cuanto a la consideración o no de la longitud total de la red de regueros en el cálculo aplicando la alternativa Lt frente a la alternativa Le.

Haciendo una comparación directa entre los errores absolutos obtenidos aplicando las alternativas Le y Lt a los dos métodos y a cada una de las cinco redes de regueros estudiadas (figuras 6.14 y 6.15) se siguen manteniendo las dos tendencias anteriormente descritas según el método aplicado: MTD o MTC.

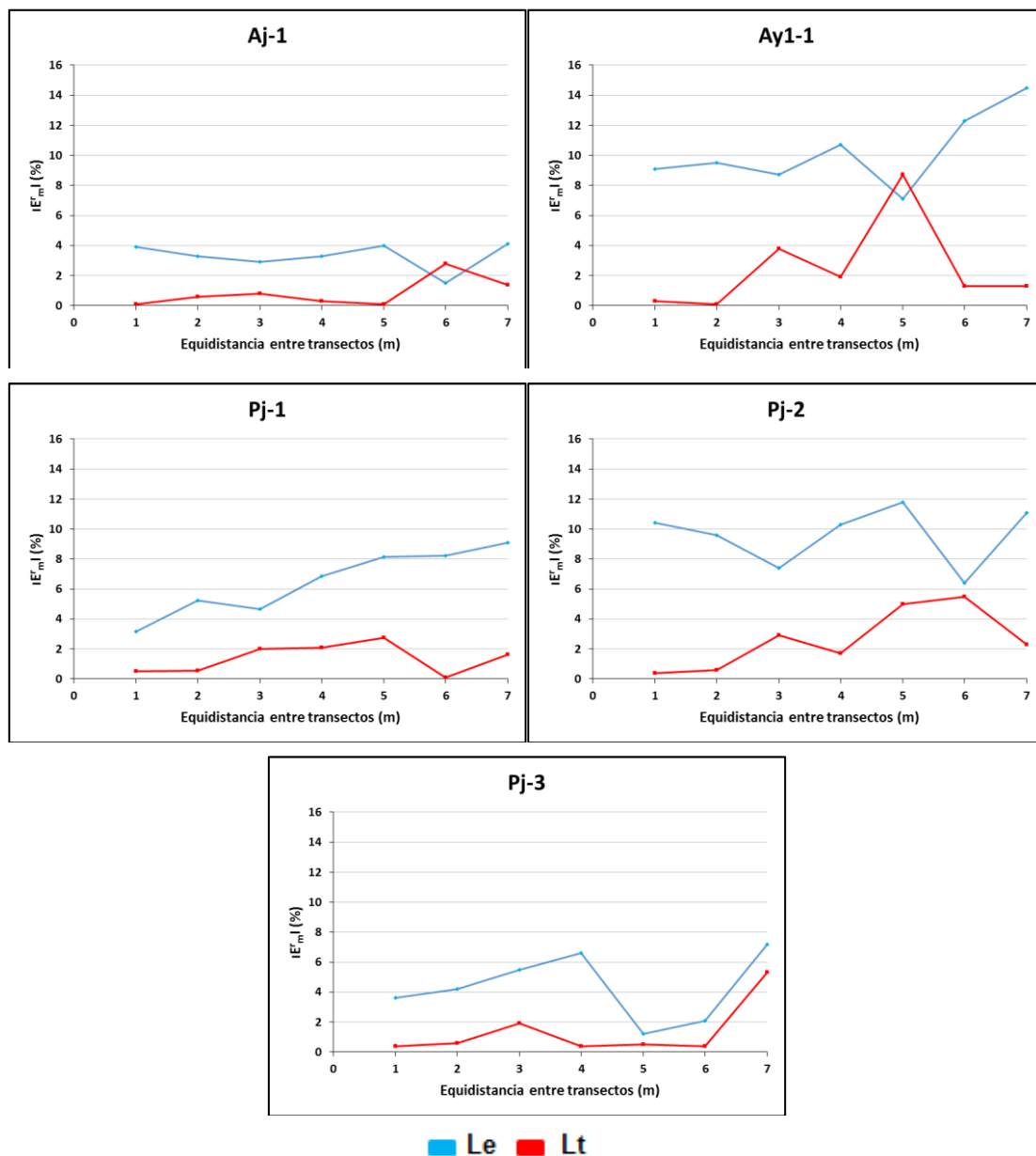


Figura 6.14: Comparativa entre los resultados obtenidos considerando la longitud equivalente de la red de regueros (azul) y considerando la longitud total de la red de regueros (rojo) al aplicar el método MTD.

En la figura 6.14, al aplicar el método MTD se observa claramente que el error considerando longitudes totales es inferior al error considerando longitudes equivalentes, con alguna excepción en los casos de Aj-1 y Ay1-1. Los errores hasta una equidistancia máxima de 4 m siempre son inferiores si se consideran las longitudes totales de la red de regueros.

Por lo tanto, si se reduce la equidistancia máxima hasta los 4 m siempre es favorable la aplicación de la alternativa Lt frente a la alternativa Le.

Una vez determinado que se reduce el error respecto al método MNP en el caso de aplicar el método MTD-Lt frente al método MTD-Le es necesario cuantificar la mejora en la precisión obtenida. Con ese objetivo, en la tabla 6.14 se plasman las diferencias de error mínimas, medias y máximas al aplicar el método MTD-Lt frente al método MTD-Le.

Tabla 6.14: Diferencia de errores absolutos entre las dos alternativas del método MTD: Le y Lt (síntesis de la tabla 13) y porcentaje de disminución del error mínimo, medio y máximo si se considera la longitud total de la red de regueros en los cinco casos de estudio aplicando el MTD.

	E _m MTD-Le - E _m MTD-Lt					Diferencia de error MTD-Lt frente a MTD-Le		
	Aj-1	Ay1-1	Pj-1	Pj-2	Pj-3	Min	Media	Max
1 m	2.7	10.0	3.2	3.8	8.8	2.7	5.7	10.0
2 m	4.7	9.0	3.6	2.7	9.4	2.7	5.9	9.0
3 m	2.7	4.5	3.6	2.1	4.9	2.1	3.6	4.9
4 m	4.8	8.6	6.2	3.0	8.8	3.0	6.3	8.8
5 m	5.4	6.8	0.7	3.9	-1.6	-1.6	3.0	6.8
6 m	8.1	0.9	1.7	-1.3	11.0	-1.3	4.1	11.0
7 m	7.5	8.8	1.9	2.7	13.2	1.9	6.8	13.2

En los resultados obtenidos se observa que se produce una disminución del error medio de, al menos, el 3%, sin olvidar que en algún caso a partir de equidistancias entre transectos de 5 m se produce que el método MTD-Le es más preciso. Al utilizar el método MTD-Lt se puede llegar a disminuir el error introducido en más de un 10% en alguna casuística concreta.

Respecto al método MTC, en la figura 6.15 se observa que se mantiene la tendencia observada en la figura 6.12, entrecruzándose las líneas que definen los errores obtenidos aplicando el método MTC-Lt (línea roja) y el método MTC-Le (línea azul) con la excepción de la red de regueros Aj-1, en el que la aplicación de la alternativa Lt ofrece menores errores frente a la alternativa Le para el total de equidistancias analizadas. En los otros cuatro casos estudiados es imposible establecer predominancia ninguna de una alternativa frente a la otra.

Por lo tanto, observado este reparto de los errores tan errático y conociendo que en el 62% de los casos el error que se obtiene es menor aplicando la alternativa Lt, frente al 38% si se aplica la alternativa Le (tabla 6.13), diferencia que se justifica fundamentalmente en la consideración del caso de Aj-1, donde si existe una diferenciación entre alternativas, se puede afirmar que no existe una diferencia notable en los resultados obtenidos aplicando el método MTC-Lt frente al método MTC-Le para la generalidad de los casos considerados, ni diferenciación alguna en función de las equidistancias consideradas.

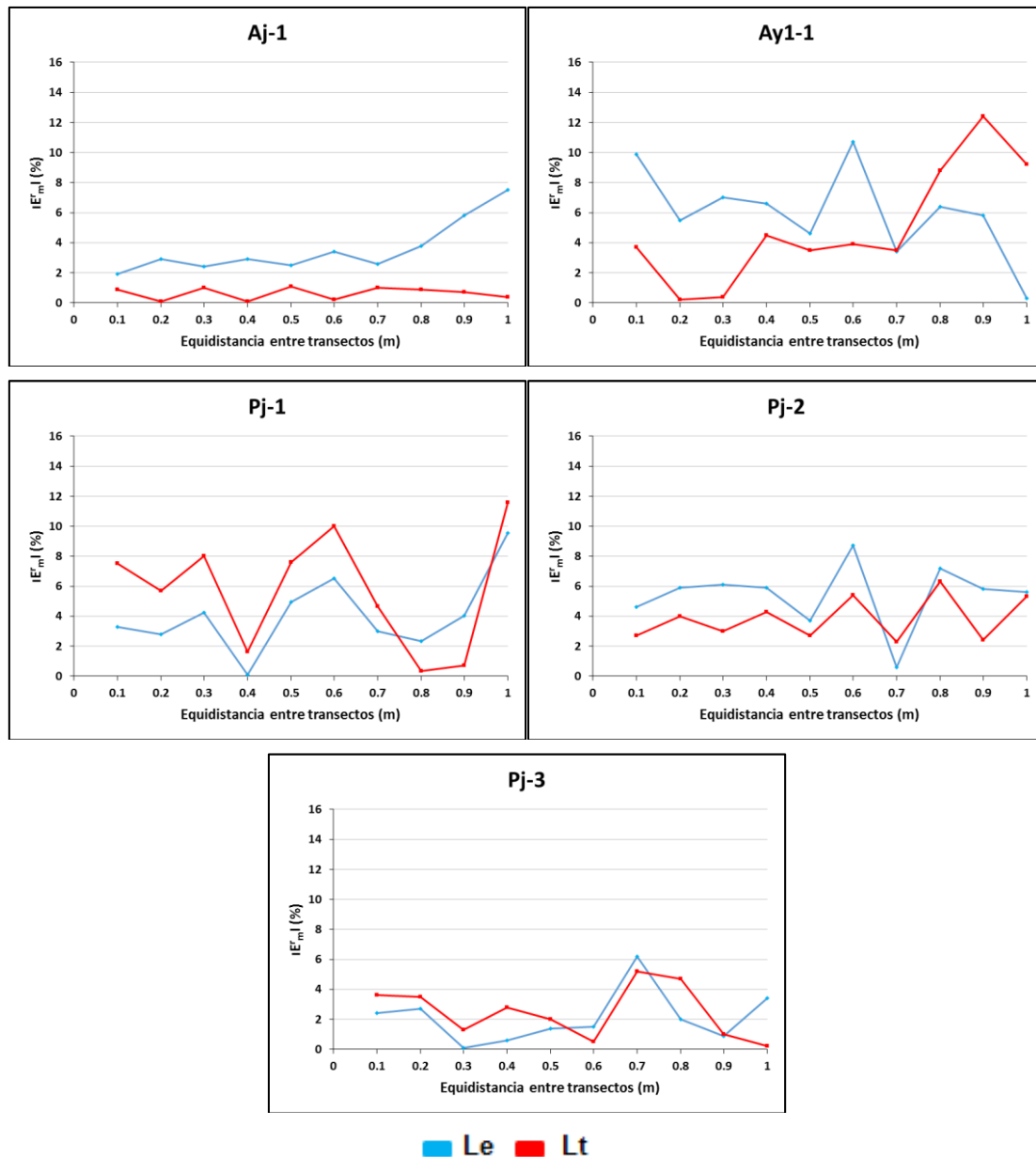


Figura 6.15: Comparativa entre los resultados obtenidos considerando la longitud equivalente de la red de regueros (azul) y considerando la longitud total de la red de regueros (rojo) al aplicar el método MTC.

En resumen, se produce una disminución del error si se considera la longitud total de la red de regueros (Lt) al aplicar el método MTD, una reducción en el error medio mínimo del 3%. Por el contrario, en el caso de aplicar el método MTC no existen diferencias considerables a la hora de aplicar las alternativas MTC-Lt o MTC-Le, por lo que, inicialmente, es más conveniente utilizar el método que requiere de un menor número de medidas, esto es, el método MTC considerando longitudes equivalentes de la red.

6.4.3.3. Determinación de la equidistancia óptima para cada uno de los métodos alternativos propuestos

Hasta el momento se han analizado todos los aspectos relacionados con la precisión de los métodos alternativos, sin embargo, no se puede olvidar que el objetivo final de la propuesta es conseguir una inversión temporal menor frente a la aplicación del método MNP en el trabajo de campo. Sin lograr este propósito es baldío conseguir la mejor precisión posible en las propuestas alternativas realizadas.

Desde el punto de vista del potencial ahorro temporal, búsqueda de la medición de un menor número de secciones transversales, se ha determinado que aplicando el método MTD a partir de equidistancias de 5 m en distancia oblicua se produce un ahorro temporal para la totalidad de las casuísticas estudiadas; mientras que aplicando el método MTC, las cinco redes de regueros aportan un ahorro temporal a partir de equidistancias de 0.6 m en cota, ahorros que van en aumento según mayor es la equidistancia considerada (ver apartados 6.4.1.3. y 6.4.2.3.). Teniendo en cuenta que el objetivo es la búsqueda del mayor ahorro temporal posible se elegirá la máxima equidistancia entre transectos dentro del umbral de error establecido para la validación de los métodos propuestos.

Por lo tanto, situando el umbral de error en el 14.5% para la totalidad de las propuestas alternativas, se considerarán equidistancias entre transectos de 7 m aplicando el método MTD y de 1 m en diferencia de cota aplicando el método MTC. Para 7 m entre transectos en distancia oblicua el ahorro mínimo es el del 37.6% que se produce en el caso de Aj-1, pudiendo llegar al 76.9% en el caso de Pj-1. Para 1 m en diferencia de cota entre transectos el ahorro mínimo que se produce es del 41% (Pj-2), pudiendo llegar al 80.6% (Ay1-1)

Sin embargo, realizando un análisis para cada alternativa conjugando la reducción del umbral de error con la reducción del número de secciones transversales a medir (ahorro temporal) se observa que los resultados son muy diferentes según cada una de las propuestas.

En las tablas 6.15, 6.16, 6.17 y 6.18 se observan los resultados de error obtenidos reduciendo las equidistancias a aquellas que aportan potenciales ahorros temporales, para las alternativas MTD-Le, MTD-Lt, MTC-Le y MTC-Lt, respectivamente.

Aplicando el método alternativo MTD-Le el umbral de error se reduce según se reduce la equidistancia a considerar, llegando a limitarse el error hasta el 11.8% para equidistancias de 5 m entre transectos. Sin embargo, a la vez que se reduce el error lo hace el potencial ahorro temporal mínimo, que para 5 m de equidistancia entre transectos se limita al 11.6% (tabla 6.15). Los errores calculados para equidistancias inferiores a los 5 m son inferiores al 11.8% correspondiente a los 5 m, por lo tanto, no modifican el valor umbral de error.

Tabla 6.15: Errores absolutos máximos y ahorros potenciales mínimos en el número de secciones transversales a medir para la alternativa MTD-Le. Las equidistancias inferiores a los 5 m no ofrecen reducción en el número de secciones transversales a medir aplicando este método.

MTD-Le			
Equidistancia	5 m	6 m	7 m
Error máximo (%)	11.8	12.3	14.5
Ahorro mínimo (%)	11.6	26.4	37.6

Aplicando el método alternativo MTD-Lt el umbral de error se reduce hasta el 8.7% para equidistancias de 5 m. Pese a que para equidistancias superiores los errores calculados son inferiores habrá de ser considerado como umbral de error el 8.7%, igualmente los errores calculados para equidistancias inferiores a los 5 m son inferiores al 8.7% correspondiente a los 5 m, por lo tanto, no modifican el valor umbral de error.

En consecuencia, si se aplica el método con equidistancias entre transectos de 7 m, se introduciría un error del 8.7% produciendo un ahorro temporal mínimo del 37.6% (tabla 6.16), que es más de una tercera parte de reducción del trabajo de campo en cuanto al número de secciones a medir. Cabe recordar, que si se aplicase este método sería necesario obtener la longitud total de la red de regueros, lo cual resulta una nueva inversión temporal y habría de ser considerada también.

Tabla 6.16: Errores absolutos máximos y ahorros potenciales mínimos en el número de secciones transversales a medir para la alternativa MTD-Lt. Las equidistancias inferiores a los 5 m no ofrecen reducción en el número de secciones transversales a medir aplicando este método.

MTD-Lt			
Equidistancia	5 m	6 m	7 m
Error máximo (%)	8.7	5.5	5.3
Ahorro mínimo (%)	11.6	26.4	37.6

Aplicando el método alternativo MTC-Le el umbral de error máximo obtenido para la equidistancia en cota 0.6 m es del 10.7%, mayor que el calculado para las equidistancias superiores consideradas, que habrá de ser considerado como el valor umbral por ser el mayor de los errores calculados. Los errores calculados para equidistancias inferiores a los 0.6 m son inferiores al 10.7%, por lo tanto, no modifican el valor umbral de error.

Para un error del 10.7%, si se aplica una equidistancia en cota de 1 m, el ahorro temporal mínimo se eleva hasta el 41%, lo que supone un ahorro en el número de medidas a tomar muy notable (tabla 6.17).

Tabla 6.17: Errores absolutos máximos y ahorros potenciales mínimos en el número de secciones transversales a medir para la alternativa MTC-Le. Las equidistancias inferiores a los 0.6 m en cota no ofrecen reducción en el número de secciones transversales a medir aplicando este método.

MTC-Le					
Equidistancia (m)	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Error máximo (%)	10.7	6.2	7.2	5.8	9.6
Ahorro mínimo (%)	0.9	15.9	25.6	33.8	41

Por último, aplicando el método alternativo MTC-Lt el umbral de error máximo obtenido para la equidistancia en cota 0.9 m es del 12.4%. Si se considera dicho error como asumible puede aplicarse el método para equidistancias en cota de 1 m entre transectos con un ahorro temporal mínimo del 41%. Sin embargo, si se busca reducir dicho umbral, se puede situar, según los valores calculados (tabla 6.18) en el 9.9% para una equidistancia máxima entre transectos de 0.8 m en cota. Los errores calculados para equidistancias inferiores a los 0.6 m son inferiores al 9.9%, por lo tanto, no modifican el valor umbral de error, produciendo un ahorro temporal mínimo del 25.6%. Cabe recordar, nuevamente, que si se aplicase este método sería necesario obtener la longitud total de la red de regueros, lo cual resulta una nueva inversión temporal y habría de ser considerado posteriormente.

Tabla 6.18: Errores absolutos máximos y ahorros potenciales mínimos en el número de secciones transversales a medir para la alternativa MTC-Lt. Las equidistancias inferiores a los 0.6 m en cota no ofrecen reducción en el número de secciones transversales a medir aplicando este método.

MTC-Lt					
Equidistancia (m)	0.6	0.7	0.8	0.9	1
Error máximo (%)	9.9	5.2	8.8	12.4	11.6
Ahorro mínimo (%)	0.9	15.9	25.6	33.8	41

En resumen, en la tabla 6.19 se indican las equidistancias óptimas para la aplicación de cada una de las alternativas al Método de la Nube de puntos, buscando conjugar la mayor precisión posible junto al mayor potencial ahorro temporal posible que se lograrían en la sustitución del método de referencia. En la propuesta MTD-Le no ha resultado clara la elección de una equidistancia óptima, pues esta dependerá del umbral de error considerado, es por ello que se han incluido en la tabla 6.19 las dos equidistancias posibles de aplicación del método que conllevan la obtención de un ahorro temporal. La equidistancia de 7 m reportaría un error del 14.5%, el mayor de todos los obtenidos, aquel que se quiere reducir, por lo tanto ha sido excluido de este punto independientemente del ahorro temporal que produjese.

Tabla 6.19: Resumen de los resultados más destacados obtenidos conjugando el error por el cambio de método introducido y el ahorro temporal logrado para cada una de las alternativas propuestas.

Método alternativo	MTD-Le	MTD-Lt	MTC-Le	MTC-Lt
Equidistancia optima	5-6 m	7 m	1 m	0.8
Error máximo introducido (%)	11.8-12.3	8.7	10.7	9.9
Ahorro mínimo (%)	11.6-26.4	37.6	41	25.6

Es, por tanto, el Método alternativo de los Transectos equidistantes según Distancias oblicuas considerando las Longitudes totales de la red (MTD-Lt) aquel que introduce, hasta el momento, un menor error respecto al Método de la Nube de Puntos (MNP) de los cuatro propuestos (8.7% de error para equidistancias de 7 m entre transectos). Además su aplicación supone un ahorro temporal notable, mínimo del 37.6% en la medición del número de secciones transversales respecto al método de referencia.

En este apartado no es el que mayor ahorro temporal produce, ya que el método MTC-Le, eleva dicho ahorro mínimo hasta el 41%, eso sí, introduciendo un error del 10.7% para equidistancias en cota entre transectos de 1 m. En este caso, además, no deberán considerarse las longitudes totales de la red de regueros. En este último apartado, el del ahorro temporal, en el caso del método MTD-Lt deberá incluirse la inversión temporal que deberá realizarse para la obtención de las longitudes de la red de regueros, asunto este que reducirá el ahorro temporal aquí calculado y determinará si es el método MTD-Lt el óptimo entre las alternativas propuestas en este capítulo.

Haber observado la importancia de considerar la longitud total de la red de regueros en los cálculos de pérdida de suelo si se aplica el método MTD obliga a determinar cuál es la forma óptima de obtener dicha longitud.

6.5. Obtención de las longitudes de las redes de regueros

Una vez se ha comprobado la importancia de considerar la longitud total de la red de regueros en los cálculos de pérdida de suelo, resulta necesario realizar una cartografía de detalle de la red de regueros para obtener las diferentes longitudes de los canales.

Se considerarán dos alternativas para su obtención:

a. Mediante un levantamiento topográfico clásico

Este procedimiento, consistente en recorrer la totalidad de la red de regueros e ir tomando, de forma más o menos sistemática, las coordenadas de un número importante de localizaciones a lo largo de la red de regueros para proceder a una posterior reconstrucción de la misma, en algunas circunstancias puede requerir de una importante inversión temporal, mayor cuanto mayor desarrollo presente la red de regueros estudiada. Sin embargo, se trata del procedimiento más preciso de los posibles.

b. Mediante restitución fotográfica de la red de regueros

La cartografía de la red de regueros puede abreviarse en campo aplicando la fotogrametría, la cual permite, a partir de una serie de fotografías y un número reducido de medidas directas en campo, cartografiar las redes de regueros y poder calcular, *a posteriori*, las longitudes de los regueros. En este caso, la inversión temporal necesaria es mucho más reducida respecto al levantamiento topográfico clásico pero será necesario evaluar el error que se introduce en el cambio de procedimiento.

6.5.1. Restitución fotográfica para la obtención de las longitudes de las redes de regueros. Método combinado de fotogrametría y transectos

La fotogrametría es una técnica para determinar las propiedades geométricas de los objetos y las situaciones espaciales a partir de imágenes fotográficas. El concepto de fotogrametría es "medir sobre fotos". En este caso, se utiliza básicamente como una técnica de medición de distancias 3D que combina fotografías junto con puntos de referencia sobre el terreno, para la restitución de las longitudes originales de la imagen.

El procedimiento de cálculo de las longitudes originales mediante la fotogrametría consta de dos partes: una primera en campo y un trabajo posterior en gabinete.

6.5.1.1. Método combinado de fotogrametría y transectos. Desarrollo en campo

Sobre la ladera erosionada se sitúan una serie de puntos de control, fácilmente identificables *a posteriori* sobre la fotografía, de las que se toman sus coordenadas (foto 6.1). Lo ideal en este caso es la realización de fotografías aéreas (perpendiculares) sobre la ladera de estudio, sin embargo, resulta logísticamente más complejo. La alternativa es la realización de fotografías oblicuas a la ladera de estudio aprovechando elevaciones contiguas. Una mayor perpendicularidad sobre la superficie de referencia facilitará su tratamiento posterior. Tanto la obtención de fotografías aéreas, por la tecnología requerida, como la obtención de fotografías oblicuas, por la necesidad de una orografía próxima concreta pueden ser limitaciones importantes al método.

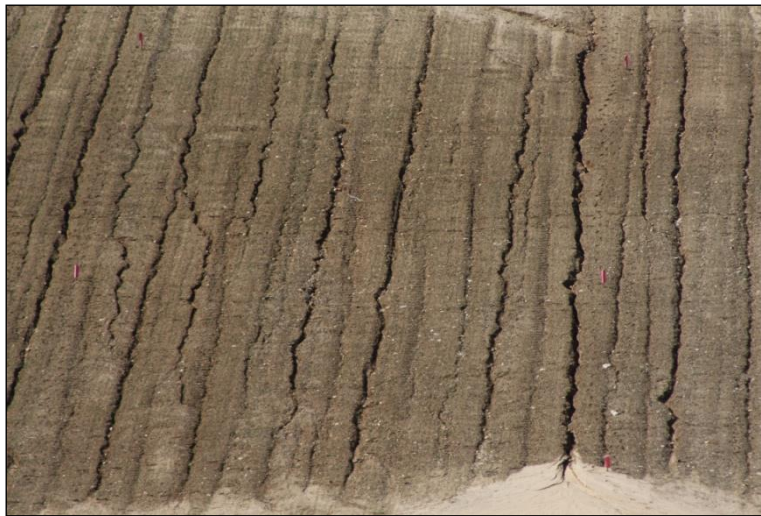


Foto 6.1: Detalle de la ladera de Ajalvir 1 con los puntos de control a los que se les han añadido distintivos llamativos, en concreto en rosa, para poder ser fácilmente identificables sobre la foto. En cada uno de ellos se han tomado las coordenadas correspondientes.

6.5.1.2. Método combinado de fotogrametría y transectos. Desarrollo en gabinete

Una vez obtenidas las fotografías es necesario un tratamiento informático de las imágenes para conseguir la restitución de las longitudes de los regueros. En este caso, ha sido utilizado el *software* informático ArcGis10® para estos procedimientos, pero puede realizarse con cualquier *software GIS*.

La primera parte del procedimiento consiste en localizar sobre la fotografía los puntos de control que se colocaron sobre el terreno y adjudicarles las coordenadas correspondientes tomadas en campo. Posteriormente, el programa ArcGis10®, mediante una transformación polinómica que utiliza un polinomio basado en los puntos de control y un algoritmo de adecuación por mínimos

cuadrados deforma las fotografías de tal manera que las longitudes en la fotografía son proporcionales a las reales (foto 6.2).

Posteriormente, sobre la fotografía ya tratada, se superponen los límites de la microcuenca hidrológica, que previamente se ha cartografiado en campo, y se realiza la cartografía de la red de regueros de forma manual (foto 6.2).

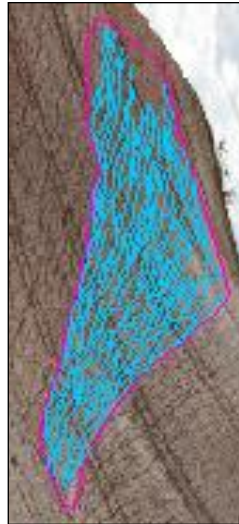


Foto 6.2: La restitución de la fotografía a longitudes reales la deforma y gira según la referencia de los puntos cardinales. Sobre la misma se superponen los límites de la microcuenca hidrológica (en fucsia sobre la fotografía) y se cartografían los regueros de forma manual (en azul).

Este procedimiento, que es técnicamente simple, introduce una subjetividad evidente, ya que la cartografía de los regueros se hace a mano sobre el soporte informático. Dependerá de algunos factores que dicha cartografía se acerque lo máximo posible a la longitud original de la red y es, en este punto, donde se introduce el error, por otro lado intrínseco a todo proceso experimental. El error dependerá de la calidad de la fotografía, limitación técnica optimizable, y de la pericia de quien desarrolle el procedimiento.

6.5.1.3. Cuantificación del error introducido al aplicar el método combinado de fotogrametría y transectos

Considerando que las limitaciones técnicas (fotográficas) y orográficas son elementos no mutables del procedimiento, queda la determinación de la influencia del factor humano en el mismo. Para estudiar este factor, han realizado la cartografía de los regueros: por un lado, una persona con un perfecto conocimiento del proceso completo con la subjetividad inherente a este conocimiento que eso supone (en adelante el doctorando); por otro lado, tres personas perfectamente ignorantes del planteamiento realizado y que solo recibieron las indicaciones necesarias para realizar el proceso de forma mecánica (voluntarios).

Para la cuantificación del error se han utilizado tres redes diferentes de regueros, aquellas tres que presentaron mayores longitudes totales del total de redes dendríticas de regueros estudiadas: Aj-1, Pj-2 y Pj-3.

Sobre estas tres redes el doctorando ha realizado, en fechas diferentes y distanciadas temporalmente para evitar la influencia del recuerdo de lo cartografiado anteriormente, tres cartografías de los regueros sobre cada uno de los tres casos propuestos. Por otro lado, los voluntarios, nueve en total, han realizado una réplica de cada uno de los tres casos de estudio hasta alcanzar, en total, tres réplicas de los tres casos de estudio. A partir de todas estas cartografías se busca:

- Cuantificar el error que se introduce en cada una de ellas.
- Determinar la influencia de la experiencia de quien desarrolla el procedimiento en los resultados.

En la tabla 6.20 se presentan los valores de error obtenidos para los tres casos de estudio planteados que han sido realizados por el doctorando. Llama la atención de los resultados que en la totalidad de las cartografías de regueros realizadas manualmente se introduce un error negativo, esto es, se cartografía algo menos de la longitud existente de los regueros, o lo que es lo mismo, no se cartografía nada que no se identifica claramente como reguero. El error máximo obtenido es del 7.29%, siendo el error medio total el 4.06%.

Tabla 6.20: Longitudes reales, longitudes medidas y sus errores relativos asociados respecto a las longitudes reales a partir de la aplicación del procedimiento de fotogrametría y de la cartografía manual de las 3 redes de regueros consideradas y realizadas por una persona con experiencia en la temática. Finalmente se presentan los errores absolutos medios para cada una de las redes de regueros y el error absoluto medio de la totalidad de los casos.

Longitud real (m)		Longitud cartografiada (persona con experiencia)						IE'ml medio
		Réplica 1		Réplica 2		Réplica 3		
		Longitud (m)	E'm	Longitud (m)	E'm	Longitud (m)	E'm	
Aj-1	5532.08	5340.43	-3.46	5485.17	-0.85	5352.20	-3.25	2.52
Pj-2	1639.02	1539.31	-6.08	1586.30	-3.22	1618.74	-1.24	3.51
Pj-3	1497.45	1414.87	-5.51	1388.28	-7.29	1412.62	-5.67	6.16
		IE'ml medio						4.06

Realizando el mismo procedimiento pero por parte de los voluntarios, sin experiencia previa, se observa (tabla 6.21): por un lado, que en este caso si se producen errores en positivo, esto quiere decir que se cartografían más regueros que los existentes realmente en las fotografías, probablemente confundiendo sombras del terreno con regueros; por otro lado, se observa que los errores aumentan con respecto al caso anterior, elevando su magnitud. El error mayor que se introduce no supera el 15% (14.63%). Los valores de error son más heterogéneos en este caso y las medias de cada caso más elevadas, aunque no superan el 10%, siendo el error absoluto medio total del 7.45%.

Tabla 6.21: Longitudes reales, longitudes medidas y sus errores relativos asociados respecto a las longitudes reales a partir de la aplicación del procedimiento de fotogrametría y de la cartografía manual de las 3 redes de regueros consideradas y realizadas por hasta 9 personas diferentes sin experiencia en la temática. Finalmente se presentan los errores absolutos medios para cada una de las redes de regueros y el error absoluto medio de la totalidad de los casos.

y el error absoluto medio de la totalidad de los casos.								
	Longitud real (m)	Longitud cartografiada (personas sin experiencia)						IE _m medio
		Réplica 1		Réplica 2		Réplica 3		
		Longitud (m)	E _m	Longitud (m)	E _m	Longitud (m)	E _m	
Aj-1	5532.08	6341.55	14.63	4974.02	-10.09	5440.10	-1.66	8.79
Pj-2	1639.02	1819.22	10.99	1447.39	-11.69	1677.62	2.36	8.35
Pj-3	1497.45	1579.14	5.46	1459.01	-2.57	1383.06	-7.64	5.22
IE _m medio								7.45

En primer término, ante estos resultados se puede afirmar, que si se obtienen las longitudes de los regueros mediante un procedimiento de fotogrametría y quien realiza la cartografía es alguien sin experiencia previa, en el procedimiento se introduce un error que es siempre inferior al 15%. Por el contrario, si quien realiza la cartografía es alguien con experiencia previa, en el procedimiento se introduce un error que es siempre inferior al 7.5%. Por lo tanto, la experiencia previa y el conocimiento global del procedimiento suponen duplicar el error introducido en la obtención de las longitudes totales de la red de regueros por fotogrametría.

Sin embargo, en contraposición con la hipótesis pesimista adoptada hasta el momento respecto a la determinación del error sobre el volumen total de pérdida de suelo, en el cual se consideró como error a considerar el máximo entre los errores calculados, en este caso, se considerará el error medio del procedimiento. Al intentar determinar el valor real de una magnitud, en este caso la longitud de la red de regueros, realizando diferentes medidas, en este caso tres repeticiones para cada una de las redes estudiadas, se obtienen una serie de valores, que se agrupan alrededor de un valor promedio, que es el valor más probable de la medida. Por lo que el error introducido al utilizar la fotogrametría como alternativa para obtener las longitudes totales de las redes de regueros debe situarse en el 4.06 % si el procedimiento lo realiza alguien con experiencia y en el 7.45% si quien lo realiza es alguien sin la misma. Nuevamente el error casi se duplica en función de la experiencia de quien realice la cartografía.

Para determinar el error final de los métodos alternativos a la nube de puntos será considerado el error medio de ambos procesos. En resumen, la aplicación de la fotogrametría supone la introducción de un error medio del 5.75% sobre la longitud total de la red de regueros. Dicho error habrá de ser añadido al anteriormente ya determinado en el cambio de método de adquisición de las secciones transversales.

Sea cual fuere el método para determinar la ubicación de las secciones transversales a medir, el volumen total de suelo perdido se obtiene multiplicando la sección media de los regueros de una red por la longitud total de los mismos (eq. 6.6).

$$V_T = S_m * L_T \quad (\text{eq. 6.6})$$

Siendo: VT: Volumen total; Sm: Sección transversal media; LT: Longitud total de la red de regueros.

Al aplicar el método de referencia, MNP, se realiza un levantamiento topográfico clásico a la vez que se van midiendo las secciones transversales correspondientes. Por lo tanto, si se aplican los métodos alternativos MTD-Lt y MTC-Lt obteniendo la longitud total de la red de regueros mediante un levantamiento topográfico clásico, no se adiciona error alguno en el segundo término de la eq. 6.6., por lo que el error total es el producido en la selección alternativa de las secciones transversales, calculado con anterioridad (ver tabla 6.19)

Sin embargo, si se utiliza la fotogrametría para obtener la longitud total de la red de regueros a la hora de aplicar los métodos alternativos MTD-Lt y MTC-Lt, al error que se introduce en la selección alternativa de las secciones transversales hay que añadir el inherente a la obtención de las longitudes totales por fotogrametría, determinando un error absoluto final del 14.95% para la alternativa MTD-Lt y del 16.22% para la alternativa MTC-Lt (tabla 6.22)

Tabla 6.22: Error absoluto (%) introducido en la aplicación de los métodos alternativos MTD-Lt y MTC-Lt aplicando la fotogrametría para las equidistancias óptimas determinadas con anterioridad.

Método alternativo Equidistancia óptima	MTD-Lt			MTC-Lt		
	7 m			0.8 m		
	IE'mISm (%)	IE'mILt (%)	IE'mIVt (%)	IE'mISm (%)	IE'mILt (%)	IE'mIVt (%)
	8.7	5.75	14.9	9.9	5.75	16.2

Por otro lado, respecto al potencial ahorro temporal, es complicado determinar la inversión temporal necesaria para llevar a cabo un levantamiento topográfico clásico. Dependerá en buena medida de las características de la red a cartografiar, pero sí parece razonable indicar que cuanto más compleja es la red más inversión temporal será necesaria y que, en todo caso, siempre requerirá de una inversión temporal superior a la aplicación de la fotogrametría, si bien resulta complicado determinar en qué medida sería superior.

Si se obtiene la longitud total de la red de regueros mediante la aplicación de la fotogrametría el procedimiento puede demorarse en campo no más de 60 minutos (valor extraído de la

experiencia del trabajo en campo), tiempo necesario para situar los diferentes puntos de control, tomar sus coordenadas y adquirir las fotografías necesarias para el trabajo posterior de gabinete.

Habiéndose determinado que la velocidad de adquisición de las secciones transversales es de 200 secciones por cada media jornada de trabajo y considerando una media jornada de trabajo de cinco horas, el tiempo necesario para la aplicación de la fotogrametría, 60 minutos, equivaldría a la toma de 40 secciones transversales. En consecuencia, en este punto pueden determinarse los potenciales ahorros temporales definitivos en caso de aplicarse los métodos MTD-Lt o MTC-Lt aplicando la fotogrametría (tabla 6.23), que alcanzan el 34.5% de ahorro respecto al método de referencia si se aplica el método MTD-Lt y el 19.2% si se aplica el método MTC-Lt.

Tabla 6.23: Potenciales ahorros temporales (%) en la aplicación de los métodos alternativos MTD-Lt y MTC-Lt aplicando la fotogrametría para las equidistancias óptimas determinadas con anterioridad.

Método alternativo	MTD-Lt (fotogrametría)	MTC-Lt (fotogrametría)
Equidistancia óptima	7 m	0.8
Ahorro mínimo (%)	34.5	19.2

6.6. Resultados finales

En la tabla 6.24 pueden observarse los errores máximos introducidos en la aplicación de cada una de las alternativas y los ahorros temporales mínimos logrados en el cambio de método para la totalidad de los métodos alternativos propuestos con sus diferentes variantes. Se trata de una síntesis de los resultados de las tablas 6.19, 6.22 y 6.23.

Tabla 6.24: Resumen de los resultados más destacados obtenidos conjugando el error por el cambio de método introducido y el ahorro temporal logrado para cada una de las alternativas propuestas.

Método alternativo	MTD-Le	MTD-Lt (levantamiento topográfico)	MTD-Lt (fotogrametría)	MTC-Le	MTC-Lt (levantamiento topográfico)	MTC-Lt (fotogrametría)
Equidistancia óptima	5-6 m	7 m	7 m	1 m	0.8 m	0.8 m
Error máximo introducido (%)	11.8-12.3	8.7	14.9	10.7	9.9	16.2
Ahorro mínimo (%)	11.6-26.4	< 34.5	34.5	41	< 19.2	19.2

Los métodos que consideran las longitudes totales de la red de regueros (MTD-Lt y MTC-Lt) resultan los más precisos de entre los alternativos al método MNP, siempre y cuando las longitudes totales de la red de regueros se obtengan mediante un levantamiento topográfico clásico. En ambos casos el error se sitúa por debajo del umbral del 10%: 8.7 y 9.9% para los métodos MTD-Lt y MTC-Lt, respectivamente, si bien la inversión temporal necesaria para realizar el levantamiento topográfico es considerable, mayor cuanto más compleja es la red, y de esa manera puede cuestionarse el ahorro temporal logrado. Dicho ahorro temporal no ha podido ser cuantificado, ya que no se ha realizado en campo un levantamiento topográfico clásico de las cinco redes estudiadas en este caso, sino que dicho levantamiento se realizó simultáneamente a la toma de las secciones transversales. En todo caso, el ahorro temporal obtenido por aplicar las alternativas MTD-Lt y MTC-Lt realizando un levantamiento topográfico de la red de regueros siempre será inferior a la alternativa fotogramétrica.

En este segundo caso, MTD-Lt y MTC-Lt aplicando la fotogrametría para la obtención de la longitud total de la red de regueros, el ahorro temporal es considerable pero el error por el cambio de método aumenta hasta el 14.9 y 16.2%, respectivamente. Con anterioridad se ha determinado un umbral máximo de error no asumible del 15%, por lo que se puede concluir que

la alternativa MTC-Lt aplicando la fotogrametría deberá ser rechazada como alternativa al método MNP por superar dicho umbral.

Por lo tanto, si se incluye la obtención de la longitud total de las redes de regueros mediante un levantamiento topográfico clásico en los cálculos, la precisión del método alternativo se puede considerar como satisfactoria: 8.7% de error absoluto, pero disminuye el ahorro temporal introducido. Si se introduce la fotogrametría entonces el ahorro temporal es mayor pero se aumenta considerablemente el error, 14.9%, hasta el punto de que los errores introducidos aplicando las alternativas que consideran longitudes equivalentes de la red de regueros (MTD-Le y MTC-Le) resultarían más precisas.

De entre estas últimas, MTD-Le y MTC-Le, la segunda produce el mayor de los ahorros temporales mínimos calculados, 41%, introduciendo un error máximo del 10.7% para equidistancias en cota de 1 m. Combinando ambos factores, puede concluirse que resulta el método óptimo entre los propuestos siempre y cuando la aplicación del método de referencia, MNP, resulte cuestionable por razones de inversión temporal.

En caso de que la adquisición de la longitud total de la red de regueros resultase imprescindible, por la circunstancia que fuere, el método óptimo sería el método MTD-Lt con equidistancias máximas de 7 m entre transectos, conociendo que se introduciría un error en su aplicación del 8.7% siempre y cuando la obtención de las longitudes de la red de regueros se obtenga mediante un levantamiento topográfico clásico. El ahorro temporal mínimo no superaría el 34.5%, no pudiendo determinarse con precisión dicho valor.

Si no se dispusiese del tiempo necesario para el levantamiento cartográfico clásico, el método combinado de fotogrametría y transectos sí que incluye este último extremo entre sus resultados, si bien eleva el error introducido hasta el 14.9% en caso de aplicar la alternativa MTD-Lt.

6.7. Procedimiento para la selección previa del método óptimo de toma de datos en campo en cada circunstancia

Es necesario desarrollar un protocolo para aplicación directa en campo que permita estimar el número de secciones transversales que potencialmente será necesario medir con cada uno de los métodos propuestos (MNP y MTD o MTC) y con ello determinar la aplicación de uno u otro para la caracterización y cuantificación de la erosión por cárcavas y/o regueros en campo.

De las conclusiones previas cabe recordar que para aplicar métodos a partir de transectos habrá de comprobarse previamente en campo:

- a) Que la red de regueros motivo del estudio requiera de la medición de más de 200 secciones transversales aplicando el Método de la Nube de Puntos (MNP).
- b) Que la aplicación de un método basado en el trazado de transectos reporte un número de secciones transversales a tomar en campo menor que si se aplica el MNP y que. Además, entre ambos métodos se produzca una diferencia notable en el número de secciones transversales a tomar.

Un cambio de método para obtener ahorros temporales insignificantes y que supongan la introducción de errores en la precisión del entorno del 10% o superiores no será asumible. Es por ello, que teniendo como referencia las 200 secciones transversales como número mínimo de secciones a medir, cuya medición se ha cuantificado en 5 horas de trabajo de campo, se propone aceptar un ahorro mínimo del 25%, 75 minutos de ahorro mínimo. Dicho umbral resulta

un valor mínimo aceptable que justificaría el cambio de método y la pérdida de precisión inherente al cambio.

El objetivo que se busca es determinar el cumplimiento de estas condiciones, en uno u otro sentido, con el mínimo posible de medidas directas en campo. Para ello, se ha desarrollado un protocolo sencillo y rápido para la estimación del número de secciones transversales que va a ser necesario medir para caracterizar una red de regueros, por un lado, si aplicásemos el Método de la Nube de Puntos y, por otro lado, si aplicásemos métodos basados en el trazado de transectos (métodos MTD o MTC).

Para estimar el número de secciones transversales que deberán medirse si se aplica el método MNP se ha de considerar el protocolo de toma de medidas en campo de este método (apartado 4.2.2.1.). De forma resumida, el método requiere, por una parte, caracterizar tres secciones transversales en torno a cada intersección entre canales y, por otra parte, la medida de una sección transversal cada 5 m de longitud como máximo. Por lo tanto, es necesario conocer el número de intersecciones entre canales (I) existentes en la red de estudio y la longitud total de la red de regueros. El primer dato es sencillo de obtener a partir de una fotografía, sin necesidad de medidas directas en campo; el segundo, la longitud total de la red, se estimará a partir de dos valores: la distancia del perfil longitudinal de la red (L) y la estimación del número de canales existentes (C). La distancia del perfil longitudinal de la red se medirá desde la posición equivalente en cota a la que se sitúa la base del reguero de menor cota hasta la posición equivalente en cota a la que se sitúa la cabecera del reguero a mayor cota. El número de canales se estimará trazando cuatro transectos perpendiculares a la dirección predominante de la red de regueros -uno a 5 m del extremo inferior del perfil longitudinal de la red de regueros, un segundo a 1/3 de la longitud total de dicho perfil, un tercero a 2/3 de la longitud total del perfil y un cuarto, y último, a 5 m del extremo superior del perfil longitudinal- y midiendo el número de canales que son interceptados por cada uno de estos transectos, obteniendo el valor medio correspondiente.

Con estos valores se plantea una ecuación (eq. 6.7) que permite estimar el número de secciones transversales que será necesario tomar para la aplicación del Método de la Nube de Puntos (MNP).

$$S_{Np} = 3I + CL/5 \quad (\text{eq. 6.7})$$

Siendo: S_{Np} : número secciones transversales que se tomarían aplicando el MNP; I: número de intersecciones (captura de un reguero por otro) en la red; C: valor medio del número de canales que se intersectan en cada uno de los cuatro transectos de control.

Por otro lado, para estimar el número de secciones transversales que deberán medirse si se aplica cualquiera de los métodos basados en el trazado de transectos (métodos MTD o MTC), se ha de considerar: por una parte, la longitud total de la red de regueros que se estimará, de nuevo, a partir del valor medio del número de canales (C) y a partir de la distancia del perfil longitudinal (L) de la red de regueros. En este caso se ha de considerar también la equidistancia en distancia oblicua (E) a la que se quieran situar los transectos, en m. Por otro lado, también se ha incluido en el cálculo la toma de los límites externos de cada uno de los transectos trazados, que si bien no requieren de la medición de una sección transversal asociada, sí que habrá que determinar obligatoriamente sus coordenadas para los cálculos.

Con estos valores se plantea una ecuación (eq. 6.8) que permite estimar el número de secciones transversales que será necesario tomar para la aplicación de cualquiera de los métodos basados en el trazado de transectos (MTD o MTC).

$$S_T = CL/E + 2L/E \quad (\text{eq. 6.8})$$

Siendo: S_T : número secciones transversales que se tomarían aplicando cualquiera de los métodos basados en el trazado de transectos; E : Equidistancia que se decida aplicar entre transectos, en distancia oblicua y en m ; C : valor medio del número de canales que se intersectan por cada uno de los cuatro transectos de control.

6.7.1. Determinación del error introducido al aplicar el procedimiento para la selección previa del método óptimo de toma de datos en campo

Este procedimiento introduce un error evidente que en ningún caso afecta al resultado final de la pérdida de suelo, sino a la posibilidad de elegir erróneamente el método óptimo de toma de datos en campo sobre la red de regueros que se quiera estudiar. Para la determinación del error asociado al protocolo propuesto se han utilizado las 22 redes de regueros dendríticas caracterizadas en este estudio. De esta manera, se encuentran entre la población seleccionada redes con características muy diferentes y que aportarán gran información sobre la validez del protocolo propuesto.

De los resultados obtenidos en el caso de la estimación del número de secciones transversales aplicando el método MNP (eq. 6.7) cabe resaltar que los valores de error presentan un rango muy amplio (tabla 6.25). Se han obtenido valores de error de hasta el 43.2%, aunque la mayoría de los errores se sitúan por debajo del 20%, hasta un 70% del total. Además, las redes que han aportado los errores mayores están todas muy por debajo de la necesidad de medir 200 secciones transversales (Ay2-3, Ay2-4, Ay2-6, Mo-1, Mo2-1 y Mo2-2). Las redes que requirieron de la medición de más de 200 secciones transversales, Pj-1, Pj-2, Pj-3, Aj-1 y Ay1-1, ofrecen errores algo menores, no superando el 20.2%, caso de la red Ay1-1.

Tabla 6.25: Número de secciones transversales reales, medidas, y estimadas con el método MNP, junto a los errores relativos que se introducen en la aplicación del procedimiento para la selección previa del método óptimo de toma de datos en campo para cada red de regueros estudiada.

Método	Nº secciones transversales	Redes de regueros										
		Paracuellos			Aj-1	Móstoles			Villarrubia			Ay1-1
		1	2	3		1	2-1	2-2	1-1	1-2	1-3	
MNP	Reales	568	634	927	1506	65	53	40	90	187	166	371
	Estimadas	494.5	725	939.4	1591.2	85	41.7	52.4	82.7	171.7	154.7	296.1
	Error relativo (%)	-12.9	14.4	1.3	5.7	30.8	21.4	31.1	-8.1	-8.2	-6.8	-20.2

Método	Nº secciones transversales	Redes de regueros										
		Arroyomolinos 2										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
MNP	Reales	23	25	172	119	15	49	64	69	25	30	18
	Estimadas	24.6	29.7	114.7	67.5	12.7	59.5	67.9	71.4	25.4	26.2	19.3
	Error relativo (%)	7.1	18.6	-33.3	-43.2	-15.1	21.5	6.1	3.5	1.6	-12.8	7

En la tabla 6.26 se presentan los valores medios, la mediana y la desviación estándar del error absoluto de los 22 casos estudiados. Cabe destacar que el valor medio del error absoluto para el total de las redes estudiadas es del 15%.

Tabla 6.26: Media, mediana y desviación estándar del error absoluto agrupando las 22 redes de regueros ($n=22$) en el caso del protocolo respecto al método MNP.

Método	Media	Mediana	Desv. estándar
MNP	15.0	12.9	11.4

Para la determinación del error en el caso de los métodos basados en el trazado de transectos se han considerado equidistancias de 7 m, por ser esta la equidistancia óptima conjugando precisión y ahorro temporal.

En el caso de la estimación del número de secciones transversales aplicando métodos basados en el trazado de transectos cabe destacar que para realizar este segundo cálculo (eq. 6.8) es necesario que el primero de ellos (eq. 6.7) ofrezca un valor en el número de secciones transversales estimadas de más de 200, en caso contrario el cálculo carece de sentido. Por lo tanto, tan solo en cinco redes de las 22 estudiadas se ha llegado a aplicar la eq. 6.8: Pj-1, Pj-2, Pj-3, Aj-1 y Ay1-1. En estos cinco casos, el error mayor que se introduce al estimar el número de secciones transversales es del 15.9% (Aj-1) y resulta siempre negativo, es decir se infraestima el número de secciones transversales a medir, con lo cual el protocolo no amplía artificialmente la diferencia entre métodos, sino que la disminuye (tabla 6.27), mientras el error absoluto medio es del 11.1% (tabla 6.28).

Tabla 6.27: Número de secciones transversales reales, medidas, y estimadas con el método MNP, junto a los errores relativos que se introducen en la aplicación del procedimiento para la selección previa del método óptimo de toma de datos en campo para las cinco redes de regueros estudiadas.

Método	Nº secciones transversales	Redes de regueros				
		Pj-1	Pj-2	Pj-3	Aj-1	Ay1-1
MTD o MTC	Reales	84	163	171	569	104
	Estimadas	72.9	157.2	145.4	478.3	95.9
	Error relativo (%)	-13.2	-3.5	-14.9	-15.9	-7.8

Tabla 6.28: Media, mediana y desviación estándar del error absoluto agrupando las cinco redes de regueros (n=5) en el caso del protocolo respecto a los métodos basados en el trazado de transectos.

Método	Media	Mediana	Desv. estándar
MNP	11.1	13.2	5.3

Resulta interesante cuestionar que sucede en aquellas redes de regueros a las cuales, al aplicarles la eq. 6.7, el resultado obtenido supera por poco el umbral de las 200 secciones transversales. Siempre a favor de la precisión cabe esperar que el método seleccionado en estos casos sea el método MNP, pero hasta qué rango se ha de mantener el método MNP como el prevalente no está claro. Sin embargo, a tenor de los resultados aquí obtenidos, si se considera el error absoluto medio del 15% puede introducirse una variación sobre el umbral anteriormente establecido en las 200 secciones transversales, situándolo en las 230 secciones transversales, en aras de elegir con la mayor claridad posible el método óptimo y favoreciendo la elección del método más preciso.

En resumen, para la selección previa del método óptimo de toma de datos en campo en cada circunstancia se han planteado dos ecuaciones (eq. 6.7 y 6.8) para cuya resolución se ha buscado el menor número de datos de campo posibles y la posibilidad de resolverlas con rapidez, con la única necesidad de la toma de una o una serie de fotografías y el trazado de algunos transectos, cuatro, y la obtención de la longitud del perfil longitudinal de la red de regueros, para los cuales solo es necesaria una cinta métrica.

Estas ecuaciones permiten estimar el número de secciones transversales aplicando, por un lado, el método MNP, por otro lado, los métodos basados en el trazado de transectos (MTD o MTC). Se ha obtenido que los resultados de la aplicación de las dos ecuaciones presentan un error absoluto medio del 15% respecto al cálculo del número de secciones transversales necesarias aplicando el método MNP y del 11.1% respecto al cálculo del número de secciones transversales necesarias aplicando los métodos MTD o MTC. La introducción de estos errores no pone en cuestión el procedimiento, ya que además se ha ampliado el rango de aplicación del método

MNP hasta las 230 secciones transversales, incluyendo el 15% de error del método, en aras de convertirlo en el método prevalente.

Se ha concluido también, que cuando la aplicación del método MNP requiera de la medición de más de 230 secciones transversales entonces habrá que comprobar si la aplicación de uno de los métodos alternativos requiere de la medición de una cuantía al menos un 25% menor de secciones transversales, lo cual se realiza mediante una simple sustracción entre el número de datos a tomar por una u otra alternativa. Si se cumplen las condiciones establecidas entonces se aplicará un método alternativo.

La aplicación del protocolo de campo se ha desarrollado con el objetivo de poderlo desarrollar sobre la misma ladera de estudio en el menor tiempo posible. El procedimiento más complejo es el de la cuantificación del número de confluencias entre canales a partir de la toma de fotografías, que requiere de algo más de inversión de tiempo, no más de una hora, según la experiencia adquirida en su puesta en práctica, siempre en las redes más complejas. Por lo tanto, la aplicación de este protocolo de campo, que puede requerir de una hora de inversión temporal, puede determinar la reducción de un porcentaje muy importante del trabajo de campo.

6.8. Futuras líneas de investigación: aplicación de la fotogrametría moderna (Structure from Motion, SfM) y uso de drones.

En el desarrollo de este capítulo ha sido utilizada la fotogrametría para restituir imágenes de laderas con rasgos de erosión, con el objetivo de poder cartografiar con posterioridad las redes de regueros sobre la fotografía. Sin embargo, los resultados obtenidos en la aplicación de la técnica no han resultado del todo satisfactorios, ya que, si bien se produce un ahorro temporal notable con su utilización, el error final obtenido aumenta de manera notable, debido a diversos errores intrínsecos al procedimiento.

El método utilizado, en el que se requería la adquisición de un importante número de puntos de control sobre el terreno para posteriormente identificarlos sobre la imagen e introducir de forma manual sus coordenadas, ha sido superado tecnológicamente. En la actualidad, este procedimiento se realiza casi de forma automática mediante la aplicación de la fotogrametría moderna o fotogrametría automática (*Structure from Motion*, SfM).

Structure from Motion (SfM) es una técnica de topografía que ha surgido de los avances en el desarrollo del tratamiento de datos mediante softwares informáticos especializados y la fotogrametría tradicional. La aplicación de la técnica puede reproducir morfologías del terreno en forma de nubes de puntos tridimensionales (3D) de alta calidad y muy densas, con costes muy reducidos (Westoby et al., 2012; Fonstad et al., 2013; Carrivick et al. 2016). Como técnica de topografía, SfM ha sido aplicada a las geociencias hace relativamente poco tiempo, si bien, su aplicación está siendo generalizada y validada en un buen número de publicaciones recientes (ver, por ejemplo, Fonstad et al., 2013; James y Robson, 2014; Smith y Vericat, 2015; Cook, 2017). El desarrollo de la tecnología surgió con el objetivo de realizar reconstrucciones 3D de monumentos y lugares de interés en el campo del turismo (Snavely et al., 2006), extendiéndose posteriormente a otros campos del conocimiento.

En este caso, la utilización de SfM permite, a partir de un gran número de fotografías y la utilización de un *software* adecuado, realizar la restitución fotográfica de forma automática, mediante la identificación de puntos comunes en las fotografías, obteniendo nubes densas de puntos a partir de las cuáles se pueden derivar Modelos Digitales de Elevaciones (MDE) de gran

resolución. SfM también usa puntos de control, para mejorar la nube de puntos, es decir, SfM no utiliza estos puntos para unir las diferentes fotografías, pero sí para escalar la nube de puntos final y alcanzar una mayor exactitud. Aun así, resultan un menor número de puntos de control que con la fotogrametría utilizada en este trabajo

A este avance, ha contribuido también la generalización en el uso de drones, vehículos aéreos no tripulados. En este caso, mediante el acople de una cámara, son utilizados con el objetivo de obtener fotografías, perpendiculares y oblicuas de las superficies motivo de estudio, que combinadas con la SfM permiten obtener los MDEs (James y Robson, 2014; Cook, 2017). De esta manera pueden evitarse las limitaciones anteriormente descritas en caso de no existir elevaciones contiguas a la ladera de estudio que permitan la obtención de fotografías y abordar mayores superficies.

La obtención de MDEs aplicando SfM es automático, si bien, si se quiere alcanzar un grado de alto de exactitud, se requiere georreferenciar los trabajos con puntos de control situados en la imagen. Teniendo en cuenta esta georreferenciación a escala de parcela se están consiguiendo modelos topográficos similares a los obtenidos con tecnología láser escáner; la exactitud con SfM frente a láser escáner va disminuyendo a medida que aumenta la superficie (Smith y Vericat, 2015).

Se ha observado que uno de los grandes problemas que presenta SfM al aplicarlo a grandes superficies estriba en que los modelos presentan deformaciones simétricas en forma de domo (James y Robson, 2014) lo que obliga a realizar una corrección mediante la introducción de puntos de referencia, que, si bien en otras circunstancias puede ser optativo para mejorar la exactitud del modelo, en este caso resulta indispensable.

Por lo tanto, queda por explorar la precisión que aportaría a los métodos propuestos la aplicación de la fotogrametría moderna (*Structure from Motion, SfM*) junto con la utilización de drones para la obtención de las fotografías. Es previsible que se redujesen los errores asociados a la restitución fotográfica, que resulta prácticamente automática en la actualidad con estas nuevas herramientas, y a la cartografía de los regueros, gracias a un aumento de la definición de la imagen final. Aun así, seguirá siendo necesaria la adquisición de un buen número de secciones cruzadas sobre el terreno que nos permitan cubicar el volumen de los regueros, sea cual sea el método de distribución de estas secciones. En la combinación más efectiva de ambas técnicas deben situarse los métodos de campo que se utilicen en adelante.

6.9. Conclusiones

El Método de la Nube de Puntos (MNP) siempre aporta las cuantificaciones de pérdida de suelo más precisas, que además son las menos dependientes de las características de la red estudiada. Por lo tanto, su aplicación es siempre recomendable. Sin embargo, la importante inversión temporal necesaria en algunas circunstancias para su aplicación, hacen necesario identificar métodos alternativos más adecuados para algunas circunstancias concretas.

Utilizando como referencia los métodos basados en la medida de secciones transversales a lo largo de los canales, una u otra distribución espacial de las secciones transversales a lo largo de la red de regueros puede optimizar el número de medidas a tomar (inversión temporal) necesaria para su cuantificación. Para ello, en este capítulo se han propuesto hasta cuatro alternativas al método de referencia, MNP, basadas en la medida de las secciones transversales sistematizadas según transectos sobre la ladera. Se han buscado alternativas al método de referencia eficientes sin dejar de lado la precisión en las medidas.

Se propone que cualquier alternativa al método MNP siempre se aplicará para redes que requieran de la medida de más de 230 secciones transversales estimadas y solo se aplicará si se produce un ahorro en el número de secciones transversales a medir igual o superior al 25%.

Para determinar la superación o no de estos dos valores umbral, se ha desarrollado un protocolo de aplicación directa en campo que, a partir de muy pocas medidas y la resolución de dos sencillas ecuaciones, permite seleccionar previamente el método más conveniente a aplicar en cada circunstancia (Método de la Nube de Puntos o métodos alternativos).

Desde el punto de vista del análisis de los errores obtenidos, se puede concluir que las cuatro propuestas metodológicas alternativas son viables para las redes dendríticas más desarrolladas, aquellas que requieren de un número superior a las 230 secciones transversales para su caracterización, conociendo que se introduce en su aplicación un error máximo del 14.5% globalmente para equidistancias máximas de 7 m en longitud oblicua o de 1 m en diferencia de cota, siempre y cuando no se utilice la fotogrametría como técnica para la obtención de las longitudes totales de la red de regueros, en cuyo caso el error supera dicho umbral y llega hasta el 16.2%.

Queda por explorar la precisión que aportaría a los métodos la fotogrametría moderna o fotogrametría automática (*Structure from Motion, SfM*), si bien es previsible que se redujesen los errores asociados a la restitución fotográfica, que resulta prácticamente automática en la actualidad con estas nuevas herramientas, y a la cartografía de los regueros, debido a la posibilidad de conjuntar un mayor número de fotografías de forma automática, aumentando de esta manera la definición de la imagen final.

Si bien, el método óptimo para aplicar en cualquier circunstancia en el que se requiera medir en campo más de 230 secciones transversales es el Método de los Transectos equidistantes según diferencias de Cota considerando Longitudes equivalentes (MTC-Le) con equidistancias entre transectos de 1 m en cota, que introduce un error máximo en su aplicación del 10.7% y reporta un ahorro temporal mínimo respecto a la medición del número de secciones transversales del 41% para las cinco redes de regueros utilizadas aquí como referencia.

Cada uno de los métodos alternativos al de la nube de puntos para la cuantificación del volumen de suelo perdido presenta bondades en su aplicación: una mayor precisión, un mayor ahorro temporal, la obtención simultáneamente a su aplicación de la cartografía de las redes de reguero, etc. No se pretende llegar a una alternativa única, sino poder adecuar los métodos empleados a las diferentes circunstancias existentes y las necesidades y disponibilidades de los investigadores, siempre conociendo los errores introducidos en la aplicación de cada uno de ellos.

El desarrollo de las propuestas alternativas, así como los cálculos necesarios, han llevado al desarrollo del software informático *Rill Morphometer* que ha permitido, a partir de los datos de campo obtenidos de la aplicación del Método de la Nube de Puntos, la simulación de todas las situaciones anteriormente planteadas y su comparativa; y permite a su vez, los cálculos de pérdida de suelo a partir de los datos que se obtengan en adelante en campo, aplicando el método elegido. *Rill Morphometer* incluye también un módulo que aporta valores topográficos de referencia de las laderas estudiadas, así como de las redes de regueros allí desarrolladas en términos de densidad, secciones de canal, etc.

La implementación de *Rill Morphometer* es una aportación original de esta Tesis.

En futuros estudios deberá profundizarse en la comparación entre la precisión del Método de la Nube de Puntos y las propuestas alternativas sobre un número mayor de redes de regueros que requieran para su caracterización de la medida de más de 230 secciones transversales.

7. INFLUENCIA DE LA TOPOGRAFÍA Y LA RUGOSIDAD ORIENTADA EN LA EROSIÓN POR REGUEROS Y CÁRCAVAS EFÍMERAS

7.1. Introducción

La topografía tiene gran influencia en el comportamiento hidrológico, erosivo y sedimentario de las cuencas. Las cárcavas efímeras reflejan dicha influencia en diferentes aspectos como su localización y morfología. El hecho de que reaparezcan en la misma posición prácticamente cada año demuestra que están muy condicionadas por la configuración del paisaje y su trayectoria representa líneas incipientes de drenaje (Lentz et al., 1993).

Son las vaguadas de los campos agrícolas, líneas de mayor concavidad, las que condicionan el drenaje, produciéndose a lo largo de las mismas una confluencia lateral de flujos de las laderas adyacentes, bien de escorrentía superficial bien de flujos concentrados, que, en este punto de inflexión de la curvatura, cambian de dirección y fluirán a favor de la pendiente. Si esta acumulación de agua supera los valores umbrales de esfuerzo cortante crítico se iniciará una incisión, que por ser recurrente en ese punto, independientemente de la magnitud del canal, se clasifica como cárcava efímera, siempre que pueda ser eliminada por las labores rutinarias de laboreo (Poesen y Govers, 1990), pudiendo llegar a ser permanente (USDA-SCS, 1992).

La influencia de la topografía también se observa en la severidad de la erosión, lo que en el caso de las cárcavas efímeras se traduce en el tamaño del área erosionada en las secciones del cauce.

La erosión por regueros, por el contrario, aparece en diferentes posiciones de la ladera tras cada evento erosivo, normalmente sobre superficies planares, de ahí que también es frecuente que, en lugar de desarrollarse siguiendo un patrón topográfico, lo hagan en cambio condicionados por las marcas existentes en el terreno, en especial la rugosidad orientada generada por los surcos de labor (Ludwig et al., 1995; Desmet y Govers, 1997; De Alba, 1998; Souchère et al., 1998, Takken, 2001a)), que tiene una gran influencia en el comportamiento hidrológico, erosivo y sedimentario de las laderas agrícolas, especialmente aquellas con morfologías planas y menos influenciadas por los factores topográficos.

Los trabajos de Takken et al. (2001a, 2001b, 2001c) ahondaron en esta cuestión y cuantificaron que en más del 75% de las superficies cartografiadas sobre laderas agrícolas las líneas de flujo coincidían con la dirección del laboreo. La conclusión de sus observaciones y modelizaciones fue que, sobre laderas agrícolas, está más cerca de la realidad asumir que las potenciales líneas de flujo están condicionadas por la rugosidad orientada, más allá de suponer que es el factor topográfico el que condiciona dichas direcciones, con la excepción de las zonas de vaguada, donde la confluencia de flujos hace que sea el factor topográfico el que condicione la dirección del flujo. La conclusión de los trabajos de Takken et al. (2001a, 2001b, 2001c) fue que las direcciones de flujo sobre las laderas cultivadas pueden ser predichas utilizando un modelo de regresión logística basado en tres parámetros: la pendiente, el ángulo existente entre la dirección del laboreo y la máxima pendiente y la intensidad de la rugosidad orientada, altura del surco definido por el laboreo. Siempre según Takken et al., introducir los valores de descarga de la precipitación en el modelo no hace que los resultados difieran de forma importante, respecto a no considerar dicho parámetro, lo cual indicaría que la intensidad de la precipitación tiene una influencia limitada en los procesos erosivos frente a la rugosidad orientada.

En base a esto, se han diferenciado dos procesos entre los estudiados:

- a) Procesos de vaguada: Aquellos en los que se desarrollan las cárcavas efímeras en la depresión que constituyen dos laderas opuestas.
- b) Procesos de ladera: Aquellos en los que se han desarrollado regueros sobre superficies planas o pseudoplanas, en las que juega un papel importante la rugosidad orientada presente en la superficie del suelo.

En algunas circunstancias es común la combinación de ambos procesos, produciéndose erosión por reguerización en las laderas de un campo agrícola con morfología cóncava que a su vez desarrolla una cárcava efímera a favor de la vaguada existente.

De entre las microcuencas caracterizadas, pueden clasificarse como el resultado de procesos de vaguada las redes de drenaje desarrolladas en las microcuencas Ay2-1, Ay2-2, Ay2-5, Ay2-8, Ay2-9, Ay2-10 y Ay2-11 así como los dos episodios erosivos estudiados en Móstones (microcuencas Mo1-1, Mo1-2 y Mo-2). A su vez, los campos de cultivo Arroyomolinos 1 y Arroyomolinos 2 desarrollaron una cárcava efímera de notables dimensiones en el fondo de vaguada. Por otro lado, pueden clasificarse como el resultado de procesos de ladera las redes de drenaje desarrolladas en las microcuencas estudiadas en Paracuellos del Jarama, Ajalvir, Villarrubia de los Ojos y los casos de las laderas de Arroyomolinos 1, junto a Ay2-3, Ay2-4, Ay2-6 y Ay2-7.

A continuación se discutirá la influencia de las relaciones de la pendiente y la superficie de drenaje sobre las secciones de los canales desarrollados, como los dos elementos de la topografía que potencialmente pueden generar una mayor influencia sobre las características de la erosión desarrollada tanto en los procesos erosivos de vaguada como en los de ladera. Por otro lado, se profundizará en los efectos producidos por la aplicación de diferentes direcciones de laboreo, en contorno, según la pendiente y oblicua, sobre la susceptibilidad del suelo ante los procesos de reguerización en los procesos erosivos de ladera.

7.2. Procesos erosivos de vaguada: relaciones de la pendiente y la superficie de la cuenca de drenaje con las secciones de las cárcavas efímeras

Los casos que presentan procesos erosivos de vaguada en este estudio presentan superficies con pendientes medias que, salvo en Mo1-1 y Mo-2, no superan el 10% a lo largo de sus perfiles longitudinales (tabla 7.1). En referencia a la pendiente local en el punto de incisión del primer canal cabe destacar la baja pendiente local existente en Ay-2. Con seguridad la gran superficie del campo de cultivo provoca un volumen suficiente de acumulación de agua en la vaguada que, sin necesidad de una importante pendiente, desencadena la incisión del canal. Así mismo, se trata de casos en los que las características de la precipitación, temporal de invierno, provocan, con seguridad, la saturación del suelo. En estas circunstancias, en las zonas de vaguada, además del propio agua de la escorrentía superficial, puede aflorar el agua subsuperficial, provocando un mayor acumulo de agua en superficie que favorece la incisión de cárcavas.

Respecto a las distancias de aparición de las incisiones respecto a la divisoria superior de aguas, las cabeceras se sitúan, normalmente, en la parte media-baja de la cuenca. Son excepciones a esta tendencia los casos de Ay2-8 y Mo-1-2. El caso de Ay2-8 puede explicarse por la morfología de la microcuenca de drenaje, donde una importante longitud lateral de la zona de cabecera (ver figura 5.13), permite un aporte lateral de agua en la parte superior de la vaguada suficiente como para producir la incisión de la cárcava muy cerca de la divisoria superior de aguas. En Mo1-2 sucede algo similar.

En el campo de cultivo Ay-2 se ha caracterizado la primera incisión en la parte baja de la vaguada pese a la importante superficie de drenaje existente, si bien este hecho no responde tanto a que el canal no incide hasta esa distancia, como a que en la parte superior del campo de cultivo había una gran cantidad de depósitos y resulto complejo definir el canal con nitidez, por lo que el valor de 406.51 m no es muy representativo del proceso.

Tabla 7.1: Valores de pendiente media, distancia de aparición de la cárcava efímera y pendiente local en la cabecera para los casos de estudio con desarrollo de procesos erosivos en vaguadas.

Microcuenca	Pendiente media (%)	Distancia de aparición de la primera incisión respecto a la divisoria superior de aguas (m)	Pendiente local en la primera cabecera (%)
Ay-1	6.89	169.3	6.4
Ay-2	3.65	406.51	2.0
Ay2-1	7.86	46.9	6.78
Ay2-2	7.54	49.1	6.23
Ay2-5	7.18	37.77	9.46
Ay2-8	7.93	3.49	8.09
Ay2-9	8.86	167.61	7.70
Ay2-10	7.95	103.16	6.66
Ay2-11	8.05	90.30	7.33
Mo1-1	14.32	67.58	16.0
Mo1-2	8.91	18.79	3.54
Mo-2	11.06	15.97	8.43

Al tratarse de cárcavas efímeras formadas por concentración de la escorrentía procedente de la propia cuenca, es característico que la erosión sea mayor en las zonas intermedias del cauce, produciendo secciones mayores, mientras que, tanto en la cabecera como en la desembocadura, el tamaño de las secciones es menor. Esto se debe a que es en las zonas intermedias donde el flujo tiene mayor energía disponible para erosionar (Foster y Meyer, 1972). Utilizando los conceptos de erosión limitada por el transporte frente al concepto de erosión limitada por el arranque por parte del flujo de partículas se puede explicar esta tendencia de la evolución de las secciones aguas abajo en las cárcavas. Cuando el sedimento disponible iguala o excede la capacidad de transporte del flujo, el transporte de sedimento está limitado por transporte, es decir, el flujo está saturado. Sin embargo, cuando el flujo puede transportar más cantidad de sedimento del que dispone, el transporte de sedimento está limitado por el abastecimiento o arranque, o lo que es lo mismo, por el sedimento disponible para ser erosionado. En las cárcavas efímeras de campos agrícolas, en las zonas elevadas, donde la descarga aumenta aguas abajo, el transporte está próximo al límite debido a la elevada disponibilidad de sedimento: es en esta zona del cauce donde las secciones aumentan ladera abajo y lo harán hasta que el flujo se sature y no tenga capacidad erosiva. A partir de ese punto, el de mayor sección de la cárcava, la sección ya no aumenta más, manteniéndose o disminuyendo. En las zonas bajas, donde normalmente la pendiente y la curvatura del fondo disminuyen, el flujo saturado en sedimento ya no tiene capacidad de arranque de partículas ocasionando que la erosión esté limitada por el transporte: es por ello que las secciones tienden a disminuir y a producirse depósitos según el flujo va perdiendo energía.

En la figura 7.1 se representan para cada uno de los campos de cultivo o microcuencas estudiadas la curva de pendientes y los valores de las superficies totales de las secciones de canal respecto a la superficie de la cuenca de drenaje para los distintos transectos de control con equidistancias en cota de 5 m, valores obtenidos mediante el programa *Rill Morphometer*.

Las representaciones muestran la tendencia esperable, un incremento de la sección aguas abajo, según se incrementa la superficie de la cuenca de drenaje, que se revierte en la parte final de la microcuenca. En el caso de Mo1-2 esta tendencia se reproduce dos veces según aumenta la superficie de la cuenca de drenaje. La segunda de las veces está condicionada por la confluencia

de dos cárcavas efímeras, que al unirse aumentan de forma considerable la sección del canal aguas abajo, para posteriormente disminuir nuevamente (ver figura 5.43).

El análisis de correlación entre la superficie de la cuenca de drenaje y las secciones del canal muestra que del total de 12 casos estudiados, hasta 8 (66%) muestran coeficientes medio-altos con significación estadística a nivel $p < 0.05$ (tabla 7.2). Sin embargo, el caso Ay2-2, pese a presentar un coeficiente de correlación alto y estadísticamente significativo, resulta una correlación inversa, siendo el único caso de estas características. Los casos Ay2-9, Ay2-10 y Ay2-11 pese a presentar coeficientes de correlación muy altos son estadísticamente no significativos.

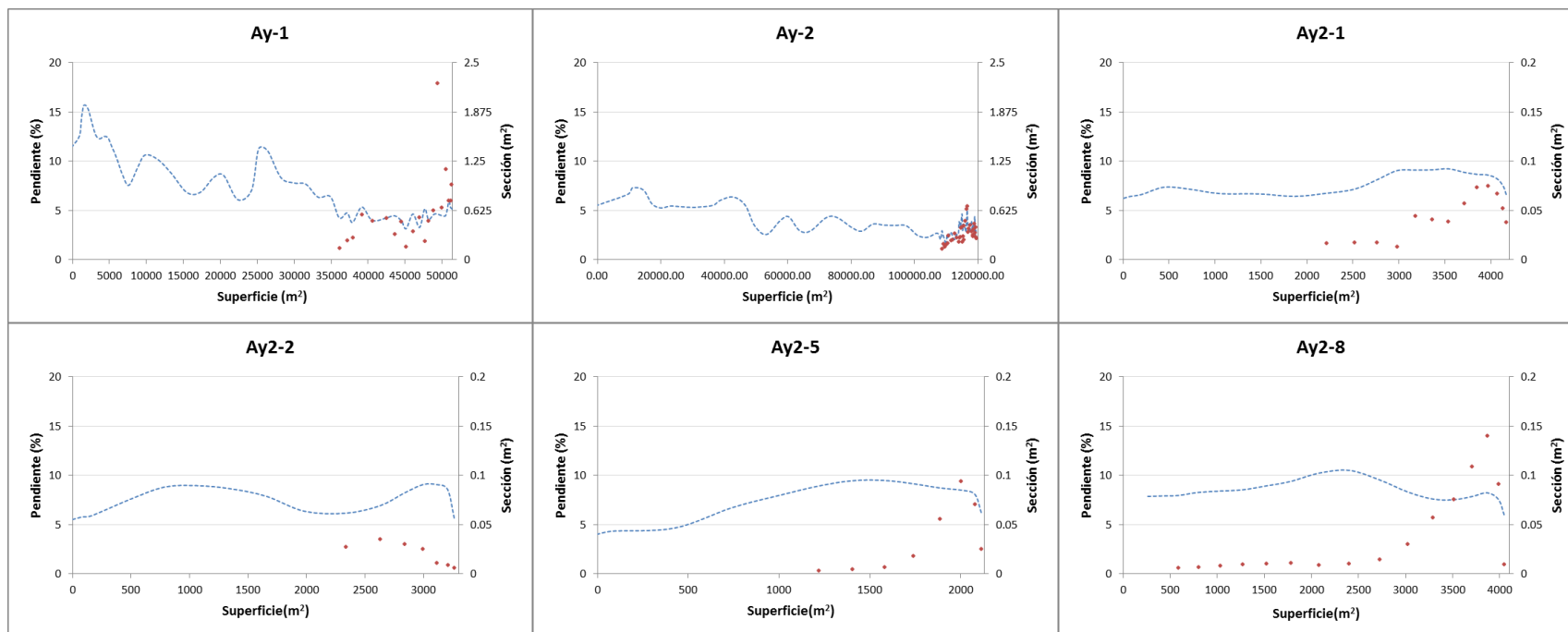
Por otro lado, el análisis de correlación entre la pendiente y las secciones del canal muestran coeficientes bajos, en algunos casos indicando correlaciones directas y en otros inversas. Apenas cuatro valores presentan significación estadística a nivel $p < 0.05$ del total de doce casos de estudio, lo que supone el 33% del total.

En definitiva, puede decirse que existe una débil correlación entre las pendientes y las secciones del canal, así como entre las superficies de drenaje y las secciones de canal, aunque en este segundo caso la correlación es algo mayor. La inexistencia de una relación clara y consistente entre las variables topográficas (en este caso pendiente y superficie de la cuenca de drenaje) y la erosión en cárcavas efímeras, hace pensar que los procesos hidrológicos que ocurren en diferentes cuencas son significativamente diferentes (Casalí, 1997).

La dirección de los surcos de labor se orienta próxima a la dirección de las curvas de nivel en todos los casos, tratándose, por tanto, de laboreos oblicuos de alto ángulo.

Tabla 7.2: Valores de correlación (r de Pearson) con el número de casos(n) correspondiente a cada una de las microcuencas para los casos de estudio con desarrollo de procesos erosivos en vaguadas. Los coeficientes subrayados presentan significación estadística a nivel $p < 0.05$.

Microcuenca	Cárcavas efímeras fondo de vaguada		n
	Correlación (r) Pendiente – Sección canal	Correlación (r) Superficie - Sección canal	
Ay-1	0.325	<u>0.593</u>	21
Ay-2	0.053	<u>0.559</u>	29
Ay2-1	0.306	<u>0.807</u>	13
Ay2-2	-0.043	<u>-0.830</u>	7
Ay2-5	-0.276	<u>0.746</u>	8
Ay2-8	-0.298	<u>0.711</u>	16
Ay2-9	0.261	0.983	4
Ay2-10	<u>0.912</u>	0.708	6
Ay2-11	<u>0.971</u>	0.881	4
Mo1-1	<u>-0.407</u>	<u>0.738</u>	27
Mo1-2	-0.153	0.133	34
Mo-2	<u>0.545</u>	<u>0.573</u>	18



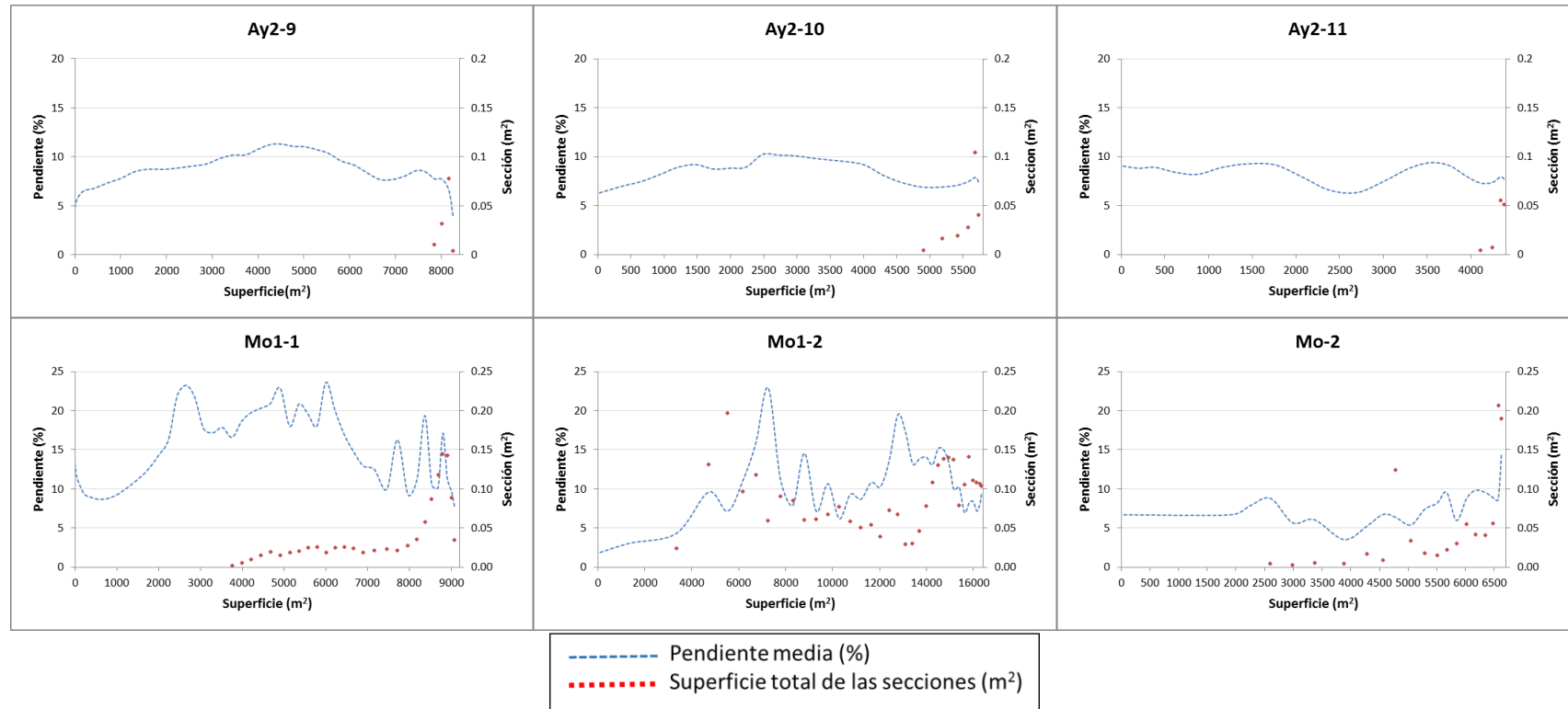


Figura 7.1: Curva de pendientes y secciones totales de los canales en los transectos de control respecto a la superficie de la cuenca drenada calculados mediante el Rill Morphometer para las microcuencas estudiadas en las que se han desarrollado procesos de vaguada.

7.3. Procesos erosivos de ladera: relaciones de la pendiente y la superficie de la cuenca de drenaje con las secciones de los regueros

Se analizan, de manera individual, los tres episodios erosivos en los que han sido estudiados procesos erosivos de ladera: Arroyomolinos, Paracuellos del Jarama-Ajalvir y Villarrubia de los Ojos, diferenciando los procesos erosivos con desarrollo de redes de regueros dendríticos de aquellos con desarrollo de redes de regueros confinados.

7.3.1. Episodio erosivo de Arroyomolinos

En el caso de Arroyomolinos no existen importantes diferencias en cuanto a los valores de pendiente media entre las distintas microcuencas con desarrollo de regueros confinados y regueros dendríticos (tabla 7.3). Sin embargo, si es destacable que la pendiente local presente en la primera cabecera un valor superior en el caso de Ay1-1, lo cual puede vincularse inicialmente a una mayor cercanía de la cabecera a la divisoria superior de aguas.

Tabla 7.3: Valores de pendiente media, distancia de aparición de la primera cabecera respecto a la divisoria superior para los casos de estudio con desarrollo de procesos erosivos de laderas en Arroyomolinos.

Microcuenca	Pendiente media (%)	Distancia de aparición de la primera incisión respecto a la divisoria superior de aguas (m)	Pendiente local en la primera cabecera (%)
Regueros dendríticos			
Ay1-1	9.12	12.68	15.67
Ay2-3	7.76	53.25	9.43
Ay2-4	8.29	39.76	10.57
Ay2-6	6.83	16.54	7.66
Ay2-7	7.23	77.89	8.35
Regueros confinados			
Ay1-2	9.43	19.59	11.63
Ay1-3	6.98	18.65	8.16

En los casos de las redes dendríticas estudiadas relacionadas con procesos erosivos de ladera, especialmente en los casos de Paracuellos y Villarrubia de los Ojos, se ha observado, a partir de valores obtenidos mediante *Rill Morphometer*, que las redes de regueros tienden a aumentar en número de canales desde la zona de cabeceras, parte superior de la red, hasta aproximadamente la mitad del perfil longitudinal de la red, donde suele alcanzarse el mayor número de canales. Posteriormente, dichos canales van confluyendo aguas abajo, reduciéndose su número, tendiendo a formar un único canal de desagüe (figura 7.2).

Esta evolución del número de canales es paralela a la evolución de la sección de los canales a lo largo de la red, que tiende a aumentar desde las cabeceras para posteriormente disminuir en la parte final de la red, según aumentan el número de confluencias y se reduce el número de canales. Al existir menos canales, aunque estos individualmente sean de mayor tamaño, ofrecen un valor final de sección total menor.

En los casos de estudio de Arroyomolinos, los regueros dendríticos presentan redes poco densas, densidades de drenaje entre 0.057 y 0.025 m m⁻², por lo que el comportamiento esperable en una red de regueros dendrítica no se observa de manera tan clara como si se hace en los casos de Villarrubia de los Ojos y Paracuellos.

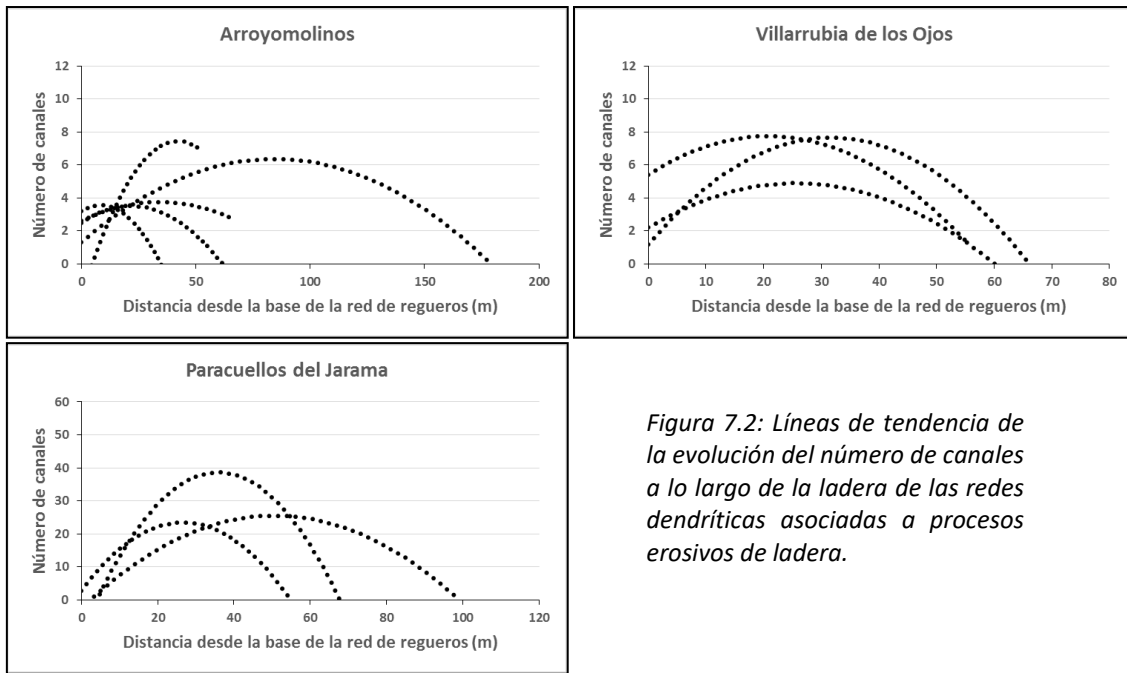


Figura 7.2: Líneas de tendencia de la evolución del número de canales a lo largo de la ladera de las redes dendríticas asociadas a procesos erosivos de ladera.

En la figura 7.3 se representan para cada una de las microcuencas estudiadas la curva de pendientes y los valores de superficies totales de las secciones de canal para los distintos transectos de control con equidistancias en cota de 5 m, valores obtenidos mediante el programa *Rill Morphometer*. En la figura puede observarse la tendencia general anteriormente descrita, si bien se trata de tendencias que presentan respuestas particulares en cada uno de los casos estudiados.

En las redes dendríticas estudiadas en Arroyomolinos se observa que las secciones se incrementan ladera abajo desde la cabecera, pero dicho incremento se prolonga en algunos casos hasta el desagüe de la red en la parte baja de la ladera, como sucede en los casos de Ay2-6 y Ay2-7.

Respecto a los regueros confinados, es esperable que la sección crezca ladera abajo hasta un máximo para posteriormente disminuir. Un reguero confinado es equivalente a un reguero de fondo de vaguada sin que haya aportes laterales de escorrentía. En este caso la cuenca de drenaje es mucho más pequeña y por ello la magnitud de la erosión es más limitada. Sin embargo, en Ay1-3 no se observa esta respuesta y las secciones presentan cierta regularidad a lo largo de la ladera para terminar disminuyendo. En Ay1-2 si se produce la respuesta esperada de crecimiento y decrecimiento de la sección en la parte final.

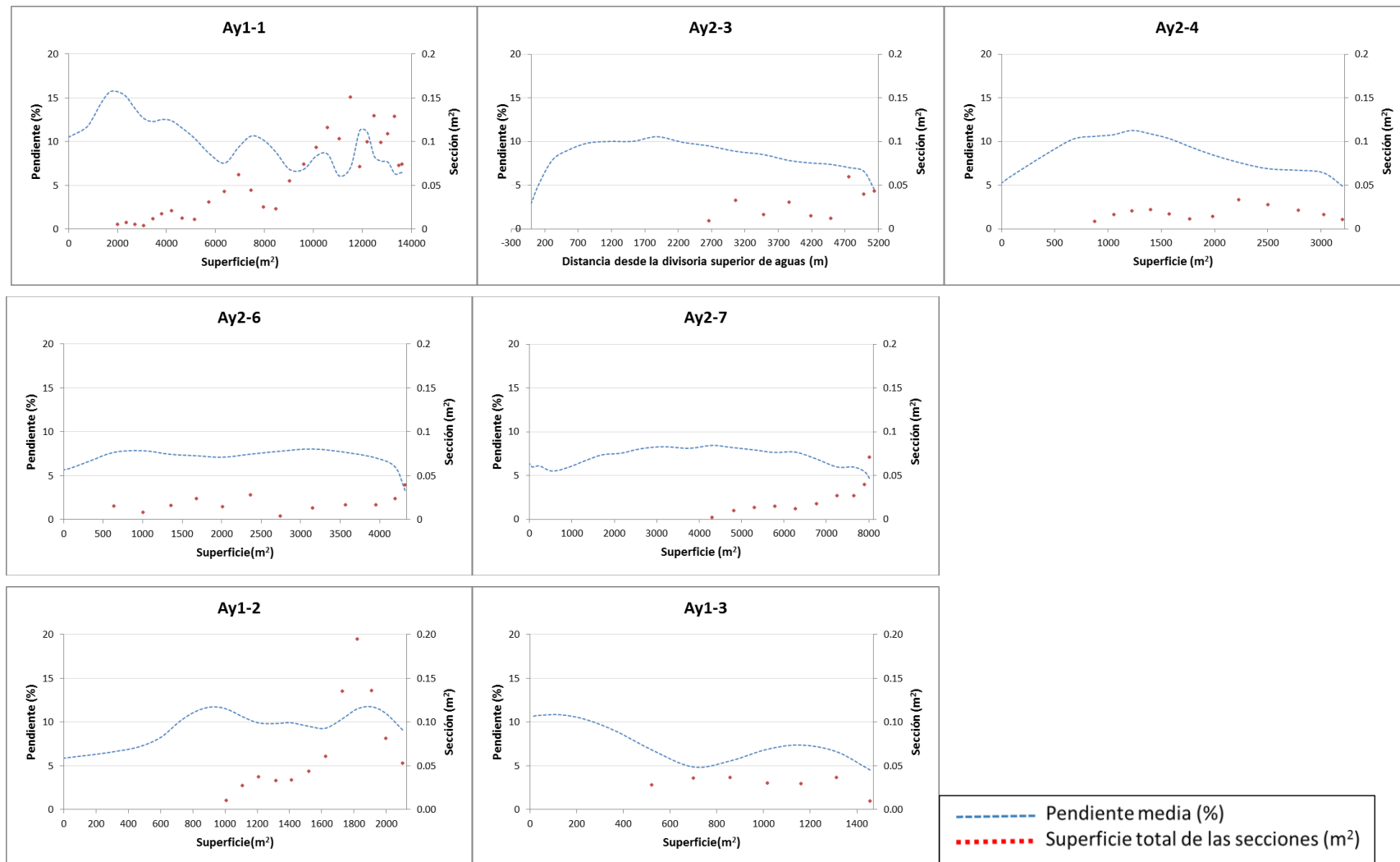


Figura 7.3: Curva de pendientes y de las secciones totales de los canales en los transectos de control calculados mediante el Rill Morphometer para las microcuencas estudiadas en Arroyomolinos.

El análisis de correlación entre la pendiente y las secciones del canal y entre la superficie de drenaje y las secciones totales obtenidas (tabla 7.4), muestra que en el caso de las redes de regueros dendríticos no hay ninguna relación entre la pendiente y las secciones, incluso cuando esta existe es inversa, lo cual quiere decir que cuando disminuye la pendiente aumenta la sección. En estas circunstancias este aumento de la sección no puede explicarse por la pendiente existente. Por otro lado, es muy irregular la relación entre la superficie y las secciones obtenidas. Mientras en algunos casos el coeficiente de r es elevado y estadísticamente significativo, Ay1-1 y Ay2-7, en otros casos es bajo o muy bajo y sin significación estadística ninguna.

En el caso de los regueros confinados se observa que para la correlación pendiente-sección el coeficiente obtenido se sitúa en torno a 0.5 para Ay1-2 e incluso el valor es inferior para Ay1-3, sin significación estadística alguna. Por otro lado, analizando la correlación existente entre la superficie y la sección, en Ay1-2 el coeficiente asciende a 0.6 con significación estadística a nivel $p < 0.5$, mientras que en Ay1-3 se trata de una correlación inversa con un valor bajo y sin significación estadística (tabla 7.4).

Tabla 7.4: Valores de correlación (r de Pearson) con el número de casos (n) correspondiente a cada una de las microcuencas para los casos de estudio con desarrollo de procesos erosivos en laderas de Arroyomolinos. Los coeficientes subrayados presentan significación estadística a nivel $p < 0.05$.

Microcuenca	Correlación (r) Pendiente – Sección canal	Correlación (r) Superficie - Sección canal	n
Regueros dendríticos			
Ay1-1	<u>-0.713</u>	<u>0.873</u>	29
Ay2-3	-0.565	0.575	9
Ay2-4	-0.133	0.153	12
Ay2-6	<u>-0.804</u>	0.431	12
Ay2-7	<u>-0.919</u>	<u>0.809</u>	10
Regueros confinados			
Ay1-2	0.467	<u>0.633</u>	12
Ay1-3	0.353	-0.470	7

Puede decirse que existe una nula correlación entre las pendientes y las secciones del canal, y que la correlación entre las superficies de drenaje y las secciones de canal es muy débil. Nuevamente, la inexistencia de una relación clara y consistente entre las variables topográficas (en este caso pendiente y superficie de la cuenca de drenaje) y la erosión en cárcavas efímeras, hace pensar que los procesos hidrológicos que ocurren en diferentes cuencas son significativamente diferentes (Casalí, 1997).

Tampoco pueden establecerse desarrollos controlados por la pendiente ni por la superficie en el caso de los regueros confinados, si bien parece que Ay1-2 respondería más a un control clásico de la topografía, especialmente de la superficie de drenaje y a un modelo clásico de cárcava efímera a la hora del incremento y posterior disminución de la sección aguas abajo, mientras en Ay1-3 esto no sucede.

7.3.2. Episodio erosivo de Villarrubia de los Ojos

En el caso de Villarrubia de los Ojos es destacable la importante pendiente media existente en la totalidad de las microcuencas, si bien es algo superior en las microcuencas con desarrollo de regueros confinados (tabla 7.5). Es también resaltante la cercanía entre la divisoria superior de aguas y las cabeceras en el caso de las redes de regueros dendríticos. Las microcuencas con desarrollo de regueros confinados presentan cierta irregularidad en este aspecto, ya que dos de los cuatro casos también presentan incisiones cerca de la divisoria superior de aguas (Vo2-1 y Vo3-2) aunque algo más lejanas que en el caso de los regueros dendríticos. Sin embargo, Vo3-1 y Vo3-3 presentan las incisiones bastante más alejadas de la divisoria. En el caso Vo3-3

prácticamente hasta la mitad de la ladera no inciden los canales en los surcos de labor, pese a no presentar diferencias notables ni de pendiente ni de longitud de ladera con las otras microcuencas con presencia de regueros confinados.

La pendiente local en las cabeceras es particularmente alta en los casos de los regueros confinados, algo menor en los regueros dendríticos.

Tabla 7.5: Valores de pendiente media, distancia de aparición de la primera cabecera respecto a la divisoria superior para los casos de estudio con desarrollo de procesos erosivos de laderas en Villarrubia de los Ojos.

Microcuenca	Pendiente media (%)	Distancia de aparición de la primera incisión respecto a la divisoria superior de aguas (m)	Pendiente local en la primera cabecera (%)
Regueros dendríticos			
Vo1-1	18.2	2.04	14.50
Vo1-2	21	1.3	12.50
Vo1-3	23.3	3.44	26.44
Regueros confinados			
Vo2-1	29.5	6.82	20.28
Vo3-1	24.9	28.55	28.52
Vo3-2	25.1	6.84	18.15
Vo3-3	24.7	55.55	24.08

En la figura 7.4 se representan para cada una de las microcuencas estudiadas la curva de pendientes y los valores de superficies totales de las secciones de canal para los distintos transectos de control con equidistancias en cota de 5 m.

En este caso, en las gráficas si se observa una importante diferencia entre la evolución de las secciones de las redes de regueros dendríticos y las de los regueros confinados.

En el caso de las redes dendríticas se aprecia un incremento moderado de la sección ladera abajo, según aumenta la superficie de la cuenca de drenaje, mientras que en los regueros confinados dicho incremento es muy notable y termina con una posterior disminución de la sección en la parte final de la ladera. En este caso, el desarrollo de los regueros confinados responde al modelo clásico de evolución de las cárcavas efímeras descrito con anterioridad.

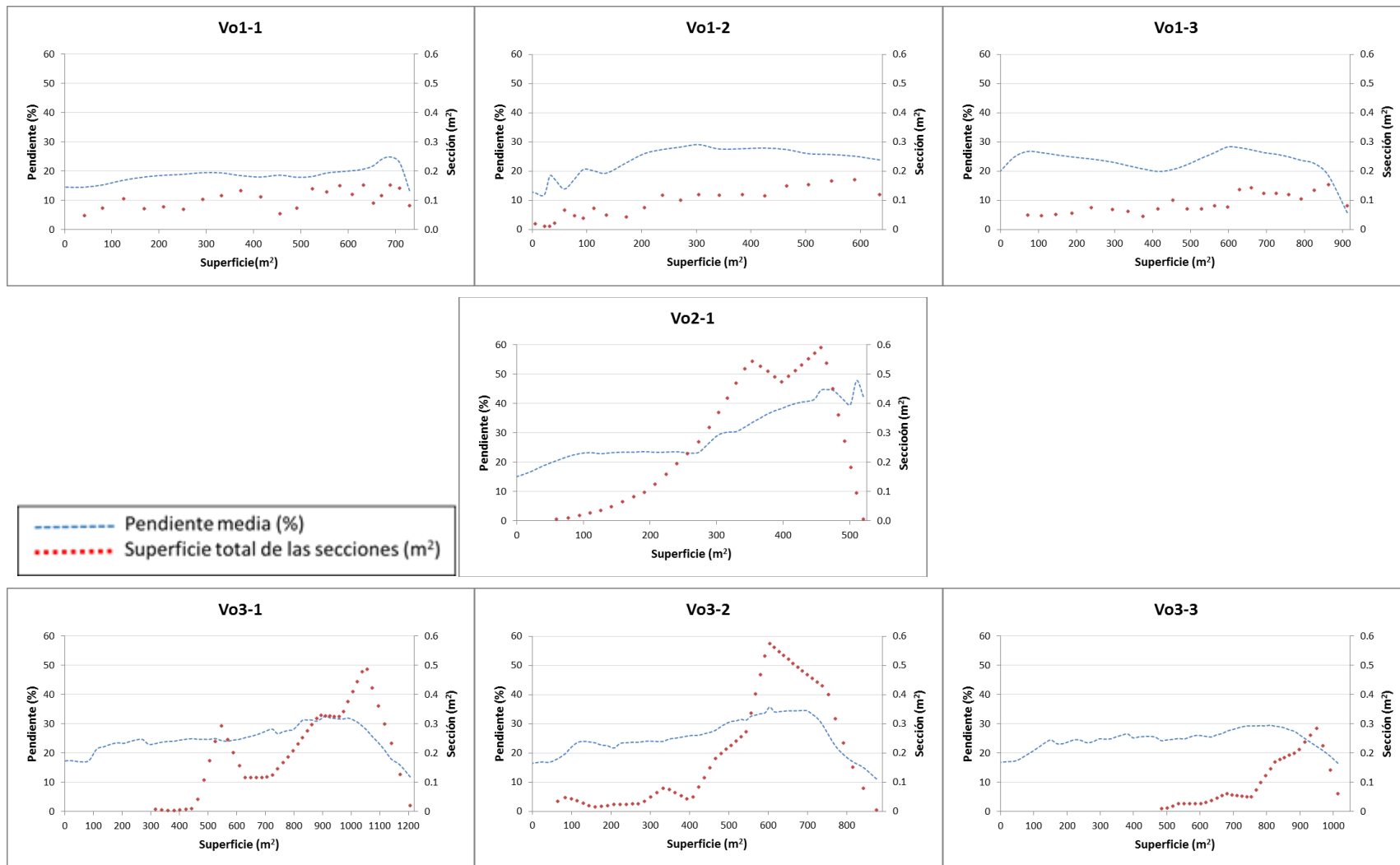


Figura 7.4: Curva de pendientes y secciones totales de los canales en los transectos calculados mediante el Rill Morphometer para Villarrubia de los Ojos.

Para los regueros dendríticos, el análisis de correlación entre la pendiente y las secciones del canal muestran respuestas irregulares. Mientras en Vo1-1 y Vo1-2 los coeficientes son superiores a 0.5 y presentan significación estadística a nivel $p < 0.05$, en Vo1-3 el coeficiente es tan bajo que indica que no existe correlación ninguna (tabla 7.6) Distintos son los resultados del análisis entre la superficie y las secciones, donde los coeficientes de correlación son medio-altos, presentando significación estadística.

Del análisis de los regueros confinados, puede observarse cierta correlación entre la pendiente y las secciones, con excepción del caso Vo3-3, mientras que el coeficiente de correlación es bueno en el caso del análisis de la relación entre la superficie y la sección de los canales, en donde todos los valores presentan significación estadística y valores de r elevados.

Tabla 7.6: Valores de correlación (r de Pearson) con el número de casos (n) correspondiente a cada una de las microcuencas para los casos de estudio con desarrollo de procesos erosivos en laderas de Villarrubia de los Ojos. Los coeficientes subrayados presentan significación estadística a nivel $p < 0.05$.

Microcuenca	Correlación (r) Pendiente – Sección canal	Correlación (r) Superficie - Sección canal	n
Regueros dendríticos			
Vo1-1	<u>0.588</u>	<u>0.582</u>	22
Vo1-2	<u>0.788</u>	<u>0.918</u>	22
Vo1-3	0.055	<u>0.791</u>	23
Regueros confinados			
Vo2-1	<u>0.625</u>	<u>0.649</u>	37
Vo3-1	<u>0.546</u>	<u>0.712</u>	47
Vo3-2	<u>0.819</u>	<u>0.698</u>	55
Vo3-3	-0.086	<u>0.830</u>	34

7.3.3. Episodio erosivo de Paracuellos del Jarama-Ajalvir

En este caso, las pendientes medias de las microcuencas de estudio son próximas al 20% para los casos de las microcuencas con desarrollo de redes de regueros dendríticos, inferiores, en el caso de las microcuencas con desarrollo de regueros confinados (tabla 7.7).

Tabla 7.7: Valores de longitud, pendiente media y distancia de aparición de la cárcava efímera respecto de la divisoria superior para los casos de estudio con desarrollo de procesos erosivos en laderas en Paracuellos del Jarama y Ajalvir.

Microcuenca	Pendiente media (%)	Distancia de aparición de la primera incisión respecto a la divisoria superior de aguas (m)	Pendiente local en la primera cabecera (%)
Regueros dendríticos			
Pj-1	18.6	28.22	19.86
Pj-2	20.9	12.91	18.42
Pj-3	20.8	3.49	13.99
Regueros confinados			
Pj-4	10.71	53.30	10.25
Aj-1	15.35	9.60	29.25
Aj-2	11.89	4.58	11.71

Sin embargo, la pendiente media de la microcuenca Aj-1, 15.35%, puede ser engañosa ya que se ha medido valores muy elevados de pendiente en la parte alta de la ladera, descendiendo de forma brusca ladera abajo (figura 7.5). Este hecho puede explicar la aparición de los regueros próximos a la divisoria superior de aguas, 9.60 m para una longitud total de casi 170 m, y con una pendiente local cercana al 30%. En Aj-2 también se produce la aparición de los regueros muy próximos a la divisoria superior de aguas con pendiente por encima del 11%. Diferente es

el caso de Pj-4, donde la pendiente es muy baja en la parte superior de la ladera y la incisión de los regueros se produce con un incremento en la pendiente que se produce a más de 50 m de la divisoria superior de aguas.

Observando la figura 7.5, donde se representan para cada una de las microcuencas estudiadas la curva de pendientes y los valores de superficies totales de las secciones de canal para los distintos transectos de control con equidistancias en cota de 5 m, parece apreciarse una correspondencia del incremento de la pendiente y de la sección total en las tres redes de regueros dendríticas. En estos tres casos, la sección total aumenta hasta aproximadamente la mitad de la ladera para posteriormente disminuir. Sucede que la densidad de drenaje es muy elevada en los tres casos y alcanza su máximo valor a media ladera, allí donde trazando un transecto se cruza un mayor número de canales (figura 7.2).

Esta correspondencia aparente entre la pendiente y la sección, se refleja en los coeficientes de correlación obtenidos, valores de r entre 0.832 y 0.422, todos con significación estadística a nivel $p < 0.05$ (tabla 7.8).

En los casos de los regueros confinados, los coeficientes de r para el análisis entre la pendiente y las secciones son variables. Tanto Pj-4 como Aj-2 muestran una correlación muy elevada entre la pendiente y la sección ($r = 0.871$ en Pj-4 y $r = 0.895$ para Aj-2, ambos con significación estadística a nivel $p < 0.05$). Dicha correlación es inexistente en el caso de Aj-1 por las razones topográficas anteriormente citadas y por tratarse de una red mixta de regueros, que se encuentra muy marcada en su desarrollo por la existencia de una vaguada que cruza diagonalmente la ladera y modifica el flujo superficial, condicionando el drenaje de la ladera.

Por otro lado, respecto al análisis de correlación entre la secciones y la superficie, los coeficientes son medios en el caso de las redes de regueros dendríticos, y mucho más irregulares para los casos de regueros confinados, donde Pj-4 presenta un valor de $r = 0.875$ con significación estadística, mientras que en el caso Aj-2 no existe correlación entre superficie y secciones a tenor del coeficiente obtenido.

Tabla 7.8: Valores de correlación (r de Pearson) con el número de casos (n) correspondiente a cada una de las microcuencas para los casos de estudio con desarrollo de procesos erosivos en laderas de Paracuellos del Jarama y Ajalvir. Los coeficientes subrayados presentan significación estadística a nivel $p < 0.05$.

Subgrupos presentan significación estadística a nivel $p < 0.05$.			
Microcuenca	Correlación (r) Pendiente – Sección canal	Correlación (r) Superficie - Sección canal	n
Regueros dendríticos			
Pj-1	<u>0.832</u>	<u>0.438</u>	24
Pj-2	<u>0.422</u>	<u>0.488</u>	42
Pj-3	<u>0.555</u>	<u>0.425</u>	24
Regueros confinados			
Pj-4	<u>0.871</u>	<u>0.875</u>	10
Aj-1	-0.214	<u>0.547</u>	41
Aj-2	0.895	-0.165	30

Puede decirse que existe una cierta correlación entre las pendientes y las secciones del canal y entre las superficies de drenaje y las secciones de canal para las redes de regueros dendríticas. Si se excluye del análisis el caso de Aj-1 para las redes de regueros confinadas, debido a sus características topográficas particulares, puede decirse que existe una alta correlación entre la pendiente y la sección de los canales en los casos de Pj-4 y Aj-2, mientras que los coeficientes de correlación son muy desiguales si el análisis comparativo se realiza entre la superficie y la sección, mostrando una alta correlación para el caso de Pj-4 y ninguna en el caso de Aj-2.

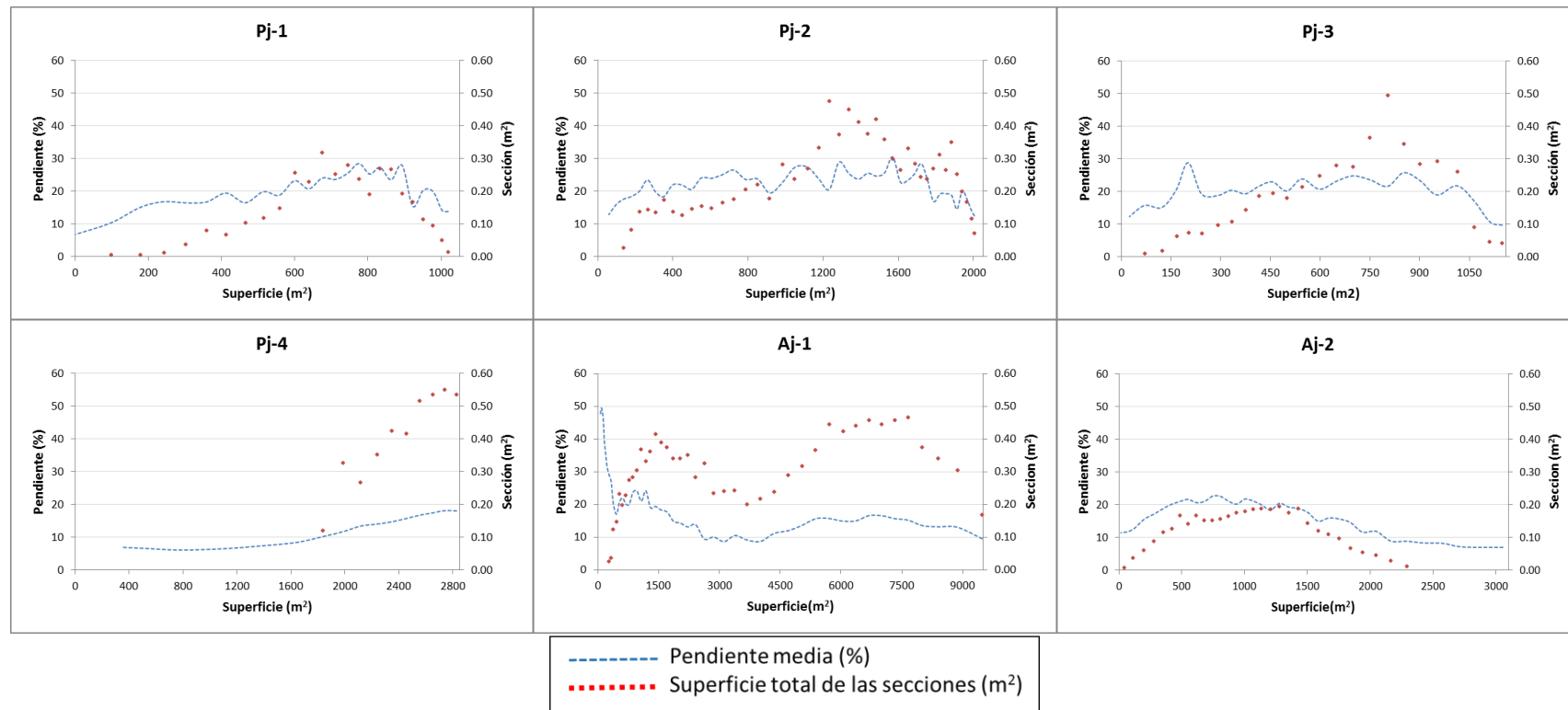


Figura 7.5: Curva de pendientes y secciones totales de los canales en los transectos de control calculados mediante el Rill Morphometer para las microcuencas estudiadas en Paracuellos del Jarama y Ajalvir.

7.4. Síntesis de los resultados

En el conjunto de los resultados obtenidos para los procesos erosivos de vaguada se puede concluir que no se observa ningún control significativo de las dimensiones de las cárcavas efímeras por parte de la pendiente de la ladera, si bien, si parece que existe una relación entre la superficie de drenaje y las secciones de la cárcava desarrollada en cada uno de los casos, si bien esta relación es débil.

Es la propia concavidad presente en la ladera la que provoca una zona de acumulación de agua suficiente para iniciar una incisión, y a ello contribuye en mayor medida la existencia de una mayor cuenca de drenaje. Burkam (1966) ya determinó un alto grado de correlación entre la descarga y el área de drenaje de la cuenca en zonas semiáridas.

En los casos de estudio con desarrollo de cárcavas efímeras en los fondos de vaguada, las secciones de canal desarrolladas presentaron una tendencia a aumentar inicialmente para en la parte final presentar una disminución de sección. Como ya se ha explicado anteriormente, esto se debe a que es en las zonas intermedias donde el flujo tiene una mayor energía disponible para erosionar (Foster y Meyer, 1972).

En los casos de los procesos erosivos de ladera, la evolución de las secciones ladera abajo, morfologías de redes dendríticas y confinadas, no dista mucho de la de los procesos erosivos de vaguada, aunque por razones bien distintas. Tanto en las redes dendríticas como en las confinadas se ha observado una tendencia a que la sección total crezca desde la parte superior de la ladera para finalmente disminuir.

En el caso de las redes de regueros confinados la tendencia de aumento y posterior disminución de las secciones del canal ladera abajo se debe a que su funcionamiento es similar al de las cárcavas de fondo de vaguada, pero a pequeña escala, escala de surco, y sin aportes laterales de flujo. En este caso es esperable que cada uno de los canales presente esta dinámica de crecimiento hasta la zona central de la ladera para posteriormente decrecer en cuanto a su sección. Este hecho responde a los modelos clásicos de variación de la sección estudiados en las cárcavas efímeras. Estos ejemplos son muy patentes sobre las laderas donde la pendiente es más pronunciada, como son los casos de Villarrubia de los Ojos.

En las redes de regueros dendríticos también se ha observado que las secciones de canal tienden a incrementarse hasta la parte intermedia de la red para posteriormente disminuir. Sin embargo, este proceso es absolutamente diferente al de los modelos clásicos de variación de la sección estudiados en las cárcavas efímeras. En este caso, se produce debido a que la densidad de drenaje tiende a crecer desde las cabeceras hasta la parte intermedia de la ladera, a partir de la cual disminuye debido a que el proceso predominante en la red es el de las confluencias entre canales. Pese a que las secciones de cada uno de los canales tiende a incrementarse ladera abajo, la disminución del número de canales en la parte baja de la ladera hace que la suma total de las secciones disminuya en esta parte final de la ladera. Por lo tanto, globalmente se reproduce la tendencia a que las secciones totales máximas se produzcan aproximadamente a media ladera, pero las secciones individuales de los canales tienden a crecer ladera abajo por las confluencias producidas.

Por otro lado, haciendo un análisis global de los coeficientes de correlación obtenidos para los tres episodios erosivos diferentes en los que se han desarrollado procesos erosivos de ladera (tabla 7.9) - con las precauciones evidentes de que se trata de episodios erosivos generados en condiciones de suelo y de precipitación diferentes- se pueden establecer ciertas diferencias entre los regueros dendríticos y confinados.

Tabla 7.9: Valores de correlación (r de Pearson) con el número de casos(n) correspondiente a cada una de las microcuencas para los casos de estudio con desarrollo de procesos erosivos de laderas. Los coeficientes subrayados presentan significación estadística a nivel $p < 0.05$.

Microcuenca	Correlación Pendiente – Sección canal	Correlación Superficie - Sección canal	n	Microcuenca	Correlación Pendiente – Sección canal	Correlación Superficie - Sección canal	n
Regueros dendríticos				Regueros confinados			
Vo1-1	<u>0.588</u>	<u>0.582</u>	22	Vo2-1	<u>0.625</u>	<u>0.649</u>	37
Vo1-2	<u>0.788</u>	<u>0.918</u>	22	Vo3-1	<u>0.546</u>	<u>0.712</u>	47
Vo1-3	0.055	<u>0.791</u>	23	Vo3-2	<u>0.819</u>	<u>0.698</u>	55
Pj-1	<u>0.832</u>	<u>0.438</u>	24	Vo3-3	-0.086	<u>0.830</u>	34
Pj-2	<u>0.422</u>	<u>0.488</u>	42	Ay1-2	0.467	<u>0.633</u>	12
Pj-3	<u>0.555</u>	<u>0.425</u>	24	Ay1-3	0.353	-0.470	7
Ay1-1	<u>-0.713</u>	<u>0.873</u>	29	Pj-4	<u>0.871</u>	<u>0.875</u>	10
Ay2-3	-0.565	0.575	9	Aj-1	-0.214	<u>0.547</u>	41
Ay2-4	-0.133	0.153	12	Aj-2	<u>0.895</u>	-0.165	30
Ay2-6	<u>-0.804</u>	0.431	12				
Ay2-7	<u>-0.919</u>	<u>0.809</u>	10				

En ambos casos se puede concluir que no se observa ningún control significativo de las dimensiones de las secciones totales de los regueros por parte de la pendiente de la ladera. En este caso en unas microcuencas se han obtenidos correlaciones directas, en otras inversas e incluso prácticamente nulas, por lo que resulta difícil determinar una tendencia común. Si son destacables dentro de los coeficientes obtenidos los resultados de Villarrubia de los Ojos. En este caso si se aprecia una mayor correlación entre pendiente y sección en los casos de los regueros confinados, menor en los regueros dendríticos, aunque hay que recordar que se trata de las localizaciones con una pendiente media más elevada, por encima del 20%. Por lo tanto, debe existir un umbral del valor de la pendiente a partir del cual si se produce un control significativo sobre las secciones desarrolladas.

Respecto a la potencial correlación entre la superficie de drenaje y las secciones de los canales sí parece observarse una cierta correlación, mayor en el caso de los regueros confinados, no pudiendo obviar que existen dos casos que presentan correlaciones negativas, los casos de Vo3-3 y Aj-1. Sin embargo, el caso de Aj-1 puede ser excluido por las razones topográficas particulares presentes sobre dicha ladera, anteriormente explicadas.

En el caso de los regueros dendríticos los valores de r son algo menores y en algunos casos no presentan significación estadística.

Además, parece que existen unos coeficientes de correlación mayores, tanto de pendiente-sección, como de superficie-sección, en los episodios erosivos que se han generado a partir de precipitaciones de carácter tormentoso, donde la intensidad de la precipitación juega un papel más relevante. En los casos de estudio desencadenados a partir de temporales invernales, es la saturación del suelo la que juega el papel más relevante, hecho en el cual influye una mayor superficie de drenaje pero en menor medida lo hace la pendiente.

En resumen, se puede determinar que existe una cierta correlación entre las superficies de drenaje y las secciones totales en los casos de los procesos erosivos de vaguada, así como en los procesos erosivos de ladera estudiados, siendo algo mayor en los casos de regueros confinados frente a los regueros dendríticos.

Por otro lado, la pendiente no presenta una correlación relevante ni en los procesos erosivos de vaguada ni en los de ladera, excepto sobre las laderas donde la pendiente es muy pronunciada. En ese caso, la pendiente es más influyente allí donde se han desarrollado regueros confinados.

7.5. Influencia de la rugosidad orientada sobre las morfologías de las redes de regueros y las tasas de erosión en los procesos erosivos de ladera

Hasta este momento, han sido descritas de forma genérica redes de regueros dendríticos y de regueros confinados para realizar una diferenciación cualitativa de estas dos morfologías, apreciable a simple vista en campo. Además esta diferenciación, basada en la morfología en planta de la red de regueros desarrollada, ha servido para la aplicación de métodos diferentes a la hora de su caracterización y de la cuantificación de la pérdida de suelo producida. Igualmente se ha realizado una aproximación a la relación existente entre la dirección del laboreo desarrollado y la morfología de las redes de regueros asociada. Sin embargo, no se han explorado en profundidad las razones del desarrollo diferenciado de las mismas, así como las consecuencias, en forma de pérdida de suelo, del desarrollo de una morfología u otra.

7.5.1. Influencia de la rugosidad orientada sobre las morfologías de las redes de regueros

La rugosidad orientada, la producida por los surcos de labor, desarrollada en las laderas condiciona la hidrología superficial de las zonas cultivadas, configurando las líneas de flujo superficial y los patrones de distribución espacial de las zonas de concentración de escorrentía de las laderas (Augustinus y Nieuwenhuysen, 1986; Fullen y Reed, 1987; Ludwig et al, 1995; Desmet y Govers, 1997; De Alba, 1998; Souchere et al. 1998; Takken et al., 2001a).

En este trabajo, los datos de campo revelan que, cuando la dirección de los surcos es a favor de la máxima pendiente o próxima a ella, se desarrollaron redes de regueros confinados en los surcos de labor, mientras que, allí donde la dirección de los surcos se determinó como próxima a nivel, el desarrollo de los regueros fue en forma de redes dendríticas. Se observaron regueros confinados en los surcos de labor con ángulos de hasta 26° entre la dirección de la labranza y la máxima pendiente, mientras que se observaron redes dendríticas de regueros a partir de ángulos mínimos de 40° (tabla 7.10). No se han podido describir escenarios en los que los ángulos entre la dirección de los surcos de labor y la pendiente se situasen entre los 26 y los 40°.

Existe una cierta transición entre los dos modelos descritos, que podrían denominarse como redes mixtas de regueros. Las mismas tienen sus cabeceras y su desarrollo inicial en el interior de los surcos de labor, respondiendo al modelo de regueros confinados, pero posteriormente fluyen a favor de la máxima pendiente, desarrollándose como redes dendríticas. Se ha identificado este modelo mixto allí donde el ángulo formado entre el laboreo y la máxima pendiente se aproximó a los 40°, (ver ejemplo de Ay2-7). Aun así, no todos los casos estudiados en los que el ángulo entre la dirección de los surcos de labranza y la máxima pendiente se sitúa próxima a los 40° responden a modelos mixtos de regueros, sino que son perfectos ejemplos de redes de regueros dendríticos, como por ejemplo sucede en el caso de Vo-1.

Tabla 7.10: Ángulo medio formado entre la dirección del laboreo y la máxima pendiente en cada una de las microcuencas estudiadas en las que se han desarrollado procesos erosivos de ladera.

Regueros dendríticos		Regueros confinados	
Microcuenca	Ángulo medio dirección laboreo - pendiente	Microcuenca	Ángulo medio dirección laboreo - pendiente
Ay1-1	68.9	Aj-1	22.5
Ay2-3	70.9	Aj-2	13.1
Ay2-4	65.8	Ay1-2	26.2
Ay2-6	62.7	Ay1-3	25.8
Ay2-7	46.1	Pj-4	17.8
Pj-1	66.8	Vo-2	8
Pj-2	74.6	Vo-3	6.7
Pj-3	71.1	Ri-2	11.3
Vo-1	40.2	Ri-3	5.9
Zo-1	85	Ri-4	23
Zo-2	85	Ceb-2	0
Valde-1	45	P-Muñoz1-2	0
P-Muñoz1-1	40		
Ri-1	84.2		
Horm-1	88		
Horm-2	88		
Ceb-1	45		

El laboreo a nivel o laboreo en contorno, es decir el realizado según una dirección próxima a las curvas de nivel, está considerado como la más elemental de las prácticas de conservación de suelo, y casi una práctica obligatoria en la actualidad en los suelos agrícolas a escala mundial. Ya desde las primeras investigaciones que concluyeron con el desarrollo de la USLE (Wischmeier y Smith, 1978), allá por los años 40 del s. XX, se defendían estos postulados. En España, son publicaciones clásicas en este sentido los trabajos del Servicio de Conservación de Suelos del Ministerio de Agricultura de los años 50 (Roquero de Laburu, 1954; Ministerio de Agricultura, 1957).

En el laboreo en contorno, la disposición de los surcos de labor supone la interrupción de los flujos de escorrentía ladera abajo, mediante la retención del agua de lluvia que se acumula en los distintos surcos. De este modo se limita la escorrentía superficial y, por tanto, los efectos erosivos que conlleva que el agua circule sobre el suelo (Rawls et al., 1980; Unger et al., 1991), a la vez que, se favorece la infiltración del agua retenida, disminuyendo el volumen total de agua sobre la ladera. Por el contrario, que los surcos de labor se direccionen a favor de la pendiente favorece el drenaje del agua ladera abajo a favor de los surcos de labor. En este caso, no se produce un impedimento a la circulación de agua a favor de la pendiente con la consabida erosión que este hecho produce. Además, el caudal y la velocidad de escorrentía aumentan ladera abajo, lo que incrementa la energía del flujo y con ello la capacidad de arranque y transporte de material de suelo (Horton, 1945; Bryan, 1987).

Esto indicaría, llevando al extremo estos conceptos, que, en aquellas laderas donde los surcos se orientan a favor de la pendiente, se producirá erosión tras cada evento de precipitación que aporte el agua suficiente para que se produzca incisión de regueros; mientras que, si los surcos se orientan siguiendo la dirección de las curvas de nivel, o, lo que es lo mismo, perpendicularmente a la pendiente, no se producirá erosión al impedirse el flujo del agua superficialmente.

Si bien es cierto que, en aquellos casos con direcciones de los surcos de labor próximos a nivel puede evitarse la generación de escorrentía superficial directa producida por la lluvia y, de esta manera, evitar que en el flujo laminar de escorrentía se puedan desarrollar núcleos de turbulencia que den lugar a la formación de flujos supercríticos con capacidad para producir la

incisión de regueros (Savat y De Ploey, 1982, Rauws, 1987, Govers, 1991), lo que resultaría en un proceso de formación de cabeceras clásico, hortoniano (Horton, 1945); es igualmente cierto que, en la colección de datos que se presentan en este trabajo se observa el desarrollo de procesos de reguerización en las laderas donde la dirección de los surcos de labor seguía direcciones próximas a nivel. Por lo tanto, se trata de un proceso erosivo diferente al proceso clásico, hortoniano, de formación de una cabecera.

7.5.1.1. Diferencias en los procesos de formación de los regueros confinados y los dendríticos

De acuerdo con Rauws y Govers (1988), la incisión de los regueros tiene lugar cuando las fuerzas de arrastre de la escorrentía superan a la resistencia de la capa superficial del suelo, por lo que las características hidráulicas del flujo, erosividad del flujo, y las propiedades particulares del suelo, erodibilidad del suelo, determinan el inicio del proceso.

Sin embargo, en el caso de los regueros dendríticos este proceso no responde a estas premisas. En estos casos, la escorrentía superficial no fluye ladera abajo a favor de la pendiente, como lo hace en los casos de los regueros confinados, sino que el flujo de agua está interrumpido por la rugosidad orientada de la ladera (figura 7.6). Los surcos de labor en estos casos presentan una dirección paralela a las curvas de nivel u oblicua a las mismas con el objetivo de interrumpir el flujo natural de agua, condicionado por la gravedad y lo reconducen a favor de la pendiente existente a lo largo de los surcos (Takken et al., 2001a). Si el laboreo se realiza en contorno *sensu stricto*, no habrá pendiente en el surco, produciéndose únicamente una acumulación de agua. Cuanto más se aleje el ángulo entre la dirección de la máxima pendiente y la dirección del laboreo de la perpendicularidad, mayor será la pendiente en el interior del surco, sumándose a la acumulación de agua en el interior de los surcos un efecto de flujo lateral.

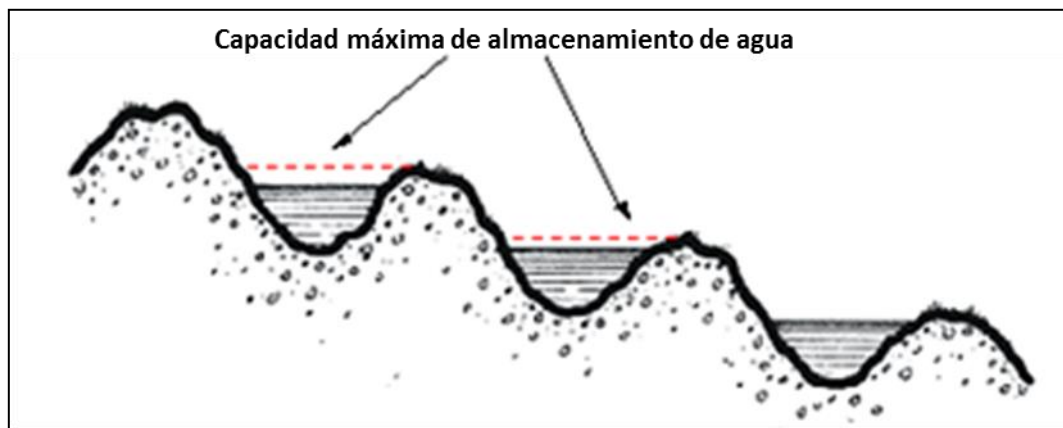


Figura 7.6: Esquema de un perfil transversal a los surcos producidos por la labranza. La línea roja indica el nivel máximo de almacenamiento de agua en el surco, sobrepasado ese límite, o quizás antes, se desencadena la rotura del caballón superior que arrastrará a los inferiores (modificada de De Alba, 1998).

En condiciones de laboreo en contorno *sensu stricto*, el proceso de formación de los regueros está relacionado con la superación del umbral de acumulación de agua que supone el caballón de los surcos. Si la precipitación no reporta suficiente agua, no se supera el umbral del caballón y no se produce flujo a favor de la máxima pendiente y, por tanto, no hay erosión. Sin embargo, cuando el volumen acumulado de agua supera la capacidad de retención máxima del surco, el agua desborda cayendo en el surco inmediatamente inferior. Durante el trasvase de agua suele ocurrir el desmoronamiento del caballón sobre el que salta el agua. De tal forma, el surco inferior, probablemente también en un estado próximo a su desbordamiento, recibe de forma súbita un importante volumen de escorrentía. El golpe de agua provoca a su vez el colapso de este segundo caballón, desencadenando un proceso de ruptura en cascada de los caballones ladera abajo, en el que, al caudal de agua, se suma una importante carga de sedimento que

producirá una corriente de agua muy erosiva. Los regueros así formados tienden a adquirir la dirección de la máxima pendiente dando lugar a la confluencia de unos con otros, y a la formación de redes de drenaje complejas de tipo dendrítico, de gran capacidad de concentración de agua ladera abajo. Como resultado final se producirá la reguerización o acarcavamiento de la ladera con una importante movilización de suelo (De Alba, 1998).

Por lo tanto, *a priori*, la eficacia del laboreo en contorno como medida para la conservación del suelo aumentará cuanto más volumen de agua pueda acumularse en los surcos. A esta mayor acumulación pueden contribuir dos circunstancias, o ambas conjuntamente. Por un lado, una mayor profundidad de los surcos de labor, la cual está ligada al manejo realizado sobre la ladera (aperos utilizados para las labores de campo). Por otro lado, la magnitud de la pendiente de la ladera, ya que una mayor pendiente hará que los caballones presenten una menor altura en su vertiente aguas arriba y, por tanto, que el volumen máximo de almacenamiento de agua se reduzca, lo cual indica que una menor pendiente favorecerá un surco con una mayor capacidad de almacenamiento de agua. Estas premisas se cumplen siempre que no se supere la capacidad máxima de almacenamiento de agua en los surcos ya que en caso de ruptura o superación del caballón, un mayor volumen de almacenamiento supondrá una mayor lámina de agua y, por consiguiente, una mayor capacidad erosiva del flujo.

Al proceso erosivo hasta aquí descrito, se añade que la dirección de los surcos de labor, que intenta ser en contorno *sensu stricto*, es decir, perfectamente perpendicular a la dirección de la máxima pendiente, termina siendo oblicua, con lo que los surcos presentan cierta pendiente en su interior. En los casos de estudio con desarrollo de regueros dendríticos (tabla 7.11) esta pendiente oscila desde valores muy pequeños (0.21, 0.22, 0.25, 0.27 o 0.63% para las microcuencas de Hormigos, Zorreras y Rielves, respectivamente, en donde el laboreo fue *quasi* perfecto a nivel) hasta valores superiores al 10% de pendiente en el surco, en los casos de Villarrubia De los Ojos, en los cuales esta fuerte desviación del laboreo a nivel tiene importantes implicaciones en los procesos erosivos desencadenados.

Tabla 7.11: Pendiente media en los surcos de aquellas microcuencas donde se han desarrollado redes de regueros dendríticas, así como los ángulos medios entre la dirección del laboreo y la máxima pendiente.

Microcuenca	Ángulo dirección laboreo-pdte	Pendiente media en la ladera (%)	Pendiente media en el surco (%)	Microcuenca	Ángulo dirección laboreo-pdte	Pendiente media en la ladera (%)	Pendiente media en el surco (%)
Ay1-1	68.9	9.12	2.138	Pj-1	66.8	18.6	7.347
Ay2-3	70.9	7.76	1.647	Pj-2	74.6	20.9	5.219
Ay2-4	65.8	8.29	2.229	Pj-3	71.1	20.8	6.489
Ay2.6	62.7	6.83	2.072	Valde-1	45	8.5	4.250
Ay2-7	46.1	7.23	3.527	P-Muñoz1-1	40	5	2.778
Vo1-1	40.2	18.2	10.071	Ri-1	84.2	9.8	0.632
Vo1-2	40.2	21.0	11.620	Horm-1	88	10.1	0.224
Vo1-3	40.2	23.3	12.893	Horm-2	88	9.8	0.218
Zo-1	85	4.9	0.272	Ce-1	45	11.5	5.750
Zo-2	85	4.6	0.256				

La existencia de pendiente a lo largo del surco produce un flujo lateral de agua hacia lugares de confluencia, pequeñas concavidades, donde se producirán acumulaciones importantes de agua. Estos lugares se convertirán, por lo tanto, en puntos potenciales de ruptura de los caballones e incisión de cabeceras de regueros. Dichos puntos potenciales de ruptura dependerán de la morfología de la ladera, ya que es previsible que la dirección de los surcos de labor sea constante, de tal modo, que el proceso será particularmente intenso en laderas con una acusada morfología en el perfil transversal, ya sea cóncava o convexa, debido a la concentración lateral de escorrentías hacia las zonas deprimidas.

Por lo tanto, en los lugares donde la dirección de los surcos de labor se sitúa paralela a las curvas de nivel o próxima a ellas, el proceso de formación de los regueros no responde al proceso clásico, hortoniano (Horton, 1945). En estas circunstancias, la distancia entre la divisoria superior de aguas y la incisión del primer reguero según el perfil longitudinal de la ladera no resulta un valor relevante a la hora del análisis del desarrollo de los regueros, si lo será a la hora de observar la superficie afectada por la erosión. La distancia a considerar en el proceso de formación de cabeceras es la existente entre la divisoria de aguas de la cuenca y la cabecera de la incisión siguiendo la dirección del surco que drena dicha cabecera, distancia a la cual se denominará, en adelante, distancia colectora.

En el caso de los regueros confinados la distancia colectora y la distancia a la divisoria superior de aguas de la incisión son equivalentes, definiéndose aguas arriba de la primera incisión una superficie sin erosión conocida como cinturón de no erosión de Horton (1945) (figura 7.7). En el caso de los regueros dendríticos, el concepto de la distancia colectora se traslada espacialmente sobre la cuenca a una distancia perpendicular u oblicua al perfil longitudinal. Este hecho permite que pueda producirse el hecho de que un reguero cuya distancia colectora pueda ser importante se sitúe topográficamente en la parte más alta de la microcuenca, lo que, por otro lado, implica una mayor superficie afectada por la erosión en la microcuenca, que deviene en una potencial mayor pérdida de suelo.

Considerando las longitudes de aparición del primer reguero según el surco que drena la cabecera para los casos de los regueros confinados y dendríticos, se obtiene que el valor medio de aparición de las cabeceras en el caso de los regueros confinados es más del doble de la longitud media para los regueros dendríticos (tabla 7.12) (figura 7.7). O lo que es lo mismo, que los casos de los regueros dendríticos necesitan de media la mitad de distancia de cuenca colectora para que incida una cabecera de reguero. Se trata de una diferencia de medias con significación estadística a nivel de $p < 0.05$, lo que hace que pueda tomarse como representativo, indicando una tendencia clara.

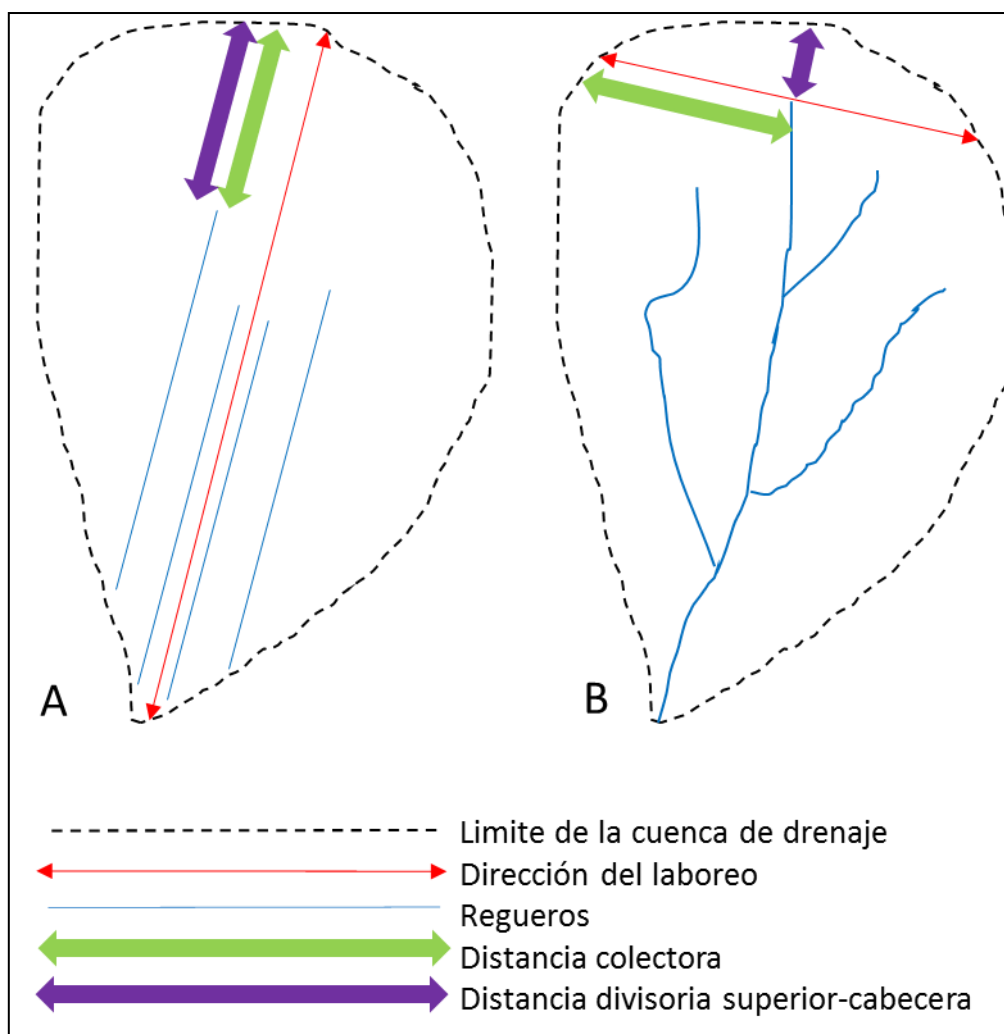


Figura 7.7: Esquema descriptivo de las diferencias existentes entre las morfologías de regueros confinados (A) y las morfologías de regueros dendríticos (B) para la determinación de la distancia colectora necesaria para que se produzca la incisión de una cabecera y la distancia desde la cabecera a la divisoria superior de aguas. Los conceptos coinciden en el caso de los regueros confinados, mientras que no lo hacen para el caso de las morfologías dendríticas.

Tabla 7.12: Distancia media desde la divisoria de aguas para los casos de regueros confinados y dendríticos atendiendo a sus diferentes procesos de formación. La diferencia de los valores medios presenta significación estadística a nivel $p < 0.05$.

	Número de casos	Distancia media	Desviación estándar (min-máx)
Dendríticos	53	16.05	14.89 (1.92-54.40)
Confinados	104	33.46	23.12 (4.66-97.11)

En la figura 7.8 se han representado: en el eje Y, los valores de distancia entre las cabeceras y las divisorias de aguas de cada microcuenca según el procedimiento diferenciador anteriormente descrito para los casos de regueros confinados (en rojo en la gráfica) y dendríticos (en azul en la gráfica); y, en el eje X, el ángulo entre la dirección de los surcos de labor y la máxima pendiente en cada una de las cabeceras consideradas. También se han trazado las líneas de tendencia de cada uno de los grupos representados. Observando la figura se aprecia una segregación en función de las morfologías que puede intentar trazarse (línea discontinua azul oscuro sobre la figura 7.8). Los puntos azules que presentan los ángulos menores y con distancias a las divisorias igualmente bajas corresponden a los casos de Villarrubia de los Ojos. Contrastan con el resto de

regueros dendríticos y probablemente el factor clave es el tipo de precipitación que desencadenó su desarrollo: supercélula convectiva.

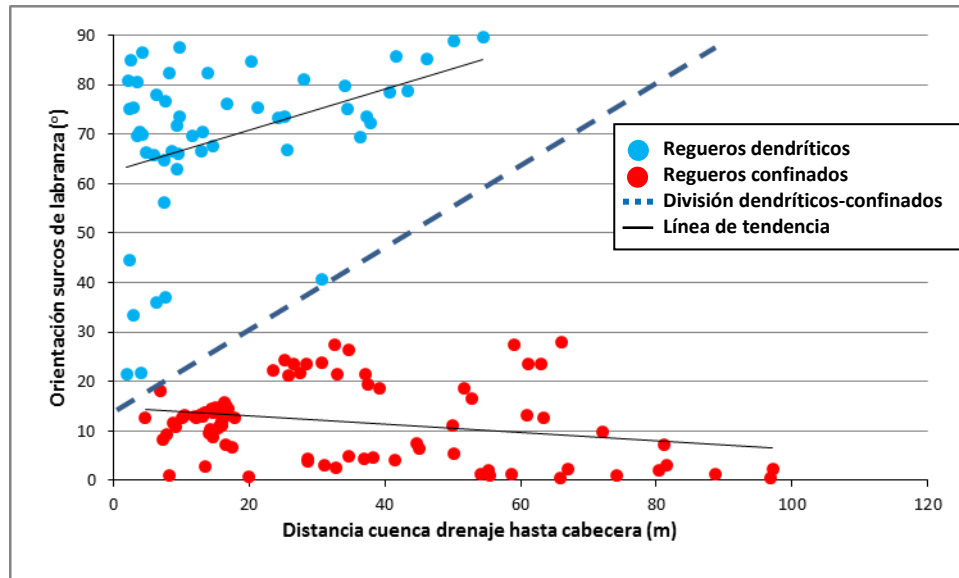


Figura 7.8: Relación entre la longitud de aparición de las cabeceras desde la divisoria de aguas de la microcuenca y el ángulo del laboreo en cada una de las cabeceras. La línea azul discontinua marca la segregación que existe entre los regueros confinados y los dendríticos.

En la gráfica se observan dos tendencias diferenciadas según la morfología de la red de regueros. En el caso de los regueros dendríticos, dicha tendencia indica que las cabeceras requieren de una menor distancia de cuenca colectora según el ángulo entre la dirección de los surcos y la pendiente disminuye. Cabe recordar que se considera laboreo a nivel aquel que forma un ángulo de 90°. Por otro lado, en el caso de los regueros confinados, la tendencia es opuesta. En este caso indica que una disminución en el ángulo entre la dirección de labranza y la pendiente distancia las cabeceras de la divisoria de aguas.

En la figura 7.8 se observa que en la mayor parte de los casos estudiados, independientemente de la morfología de las redes de regueros, las primeras cabeceras tienen su incisión antes de los 20 m de distancia colectora. Sin embargo, mientras en los casos de los regueros dendríticos el valor máximo en este aspecto se sitúa en el entorno de los 50 m, donde se desarrollan morfologías confinadas dicha barrera se eleva hasta casi los 100 m de distancia colectora. Estos valores vuelven a reflejar la relación expresada en la tabla 7.12, observándose de nuevo que los valores máximos de distancia colectora son el doble en el caso de las morfologías confinadas respecto a las dendríticas.

Además, mientras el valor máximo de 100 m en el caso de los regueros confinados puede trasladarse a que existe una distancia equivalente desde la divisoria superior de aguas libre de erosión (cinturón de no erosión de Horton (1945)), en el caso de los regueros confinados no puede hacerse esta traslación directa, siendo, con seguridad, las distancias de las cabeceras a la divisoria superior de aguas, inferiores a las distancias colectoras, afectando por tanto la erosión a una mayor superficie de la ladera estudiada.

Considerando toda la explicación anterior respecto a la relación entre las distancias divisoria superior de aguas-cabecera y el ángulo entre la dirección de los surcos de labor y la pendiente, es esperable, en un marco teórico, que,

- Donde la dirección de la labranza y la máxima pendiente son perfectamente perpendiculares, no existiendo pendiente en el interior del surco y, por ende, no

habiendo flujo lateral de agua en el mismo, el proceso erosivo se iniciará exclusivamente por desbordamiento cuando la acumulación de agua en el surco supere la altura del caballón que la contiene. En estas circunstancias se desarrollará una red de regueros dendríticos. Además, es posible que se produzcan cabeceras muy próximas a la divisoria superior de aguas, ya que potencialmente la erosión puede desencadenarse a partir del primer surco de labor desde la divisoria superior, viéndose afectada por erosión la totalidad de la superficie de drenaje.

- Donde la dirección de la labranza y la máxima pendiente no son perpendiculares, sino oblicuas de mayor o menor grado, se propicia la existencia de cierta pendiente en el interior de los surcos. En estas circunstancias, el agua fluirá lateralmente hasta acumularse en pequeñas concavidades, donde terminará por desbordar, dando lugar a la formación de redes de regueros dendríticos. En este caso, al producirse el flujo del agua a lo largo del surco, la distancia potencial desde la cabecera a la divisoria superior de aguas se alejará, será mayor, y lo hará en mayor medida según la distancia colectora a lo largo del surco hasta la cabecera del primer reguero sea mayor, es decir donde el flujo lateral de agua en el surco recorra una mayor distancia hasta desbordar el caballón. Cuanto más oblicuo sea el ángulo entre la dirección de la labranza y la máxima pendiente, o lo que es lo mismo, cuanto más se aleje de la perpendicularidad, más pendiente en el interior del surco y, es de esperar, que el agua recorra una mayor distancia hasta desbordar, aunque en este proceso un papel relevante recae en la morfología de la ladera y la irregularidad de los surcos de labranza: la existencia de pequeñas concavidades en el interior del surco que acumulen el agua y favorezcan su desbordamiento. Por lo tanto, una mayor oblicuidad entre la dirección de la labranza y la máxima pendiente tenderá a alejar las cabeceras de la divisoria superior de aguas.
- Donde la dirección de la labranza y la máxima pendiente se aproximan tanto que la incisión de cabeceras no se produce por desbordamiento sino por un proceso clásico hortoniano en el interior de los surcos. El caso extremo es aquel en el que la dirección de la labranza coincide con la de la máxima pendiente o esta próxima a ella. En estas circunstancias se desarrollará una red de regueros confinados de canales paralelos entre sí, ya que no se produce desbordamiento, con lo cual no hay conectividad lateral (confluencias) entre los regueros formados. Siguiendo la evolución hasta aquí descrita, en este caso se producirá la mayor distancia entre las cabeceras y la divisoria superior de aguas.

En un marco teórico, es esperable que cuanto más se acerque la dirección de la labranza a la máxima pendiente más se alejen las cabeceras de la divisoria superior de aguas, aumentando la superficie libre de erosión. La evolución teórica de la relación entre el ángulo del laboreo con la máxima pendiente y la distancia entre la divisoria superior de aguas y las cabeceras se presenta en la figura 7.9. En la misma puede observarse que se ha establecido una zona entre los 25 y los 40 grados en el ángulo entre la dirección de los surcos y la máxima pendiente en la cual no se tienen ejemplos de desarrollo de regueros dendríticos o confinados.

El caso de los regueros confinados se trata de regueros paralelos que se han desarrollado en el interior de los surcos de labor cuando la labor se ha realizado próxima a la máxima pendiente, según los casos de estudio hasta un máximo de 26°, y que presentan un desarrollo muy similar en todos los casos. Sin embargo, existe una amplia variabilidad entre las morfologías de las redes dendríticas estudiadas. Es común a todas ellas que las direcciones de los surcos de labor se hayan desarrollado entre próximas a nivel y oblicuas a la máxima pendiente, hasta el entorno de los 40°. En el gráfico se plasma que la complejidad de la red dendrítica tiende a aumentar según el ángulo formado entre la dirección de los surcos de labor y la máxima pendiente es más próximo a los 90°: ejemplos B y C (caso de Ay2-3) en la figura 7.9.

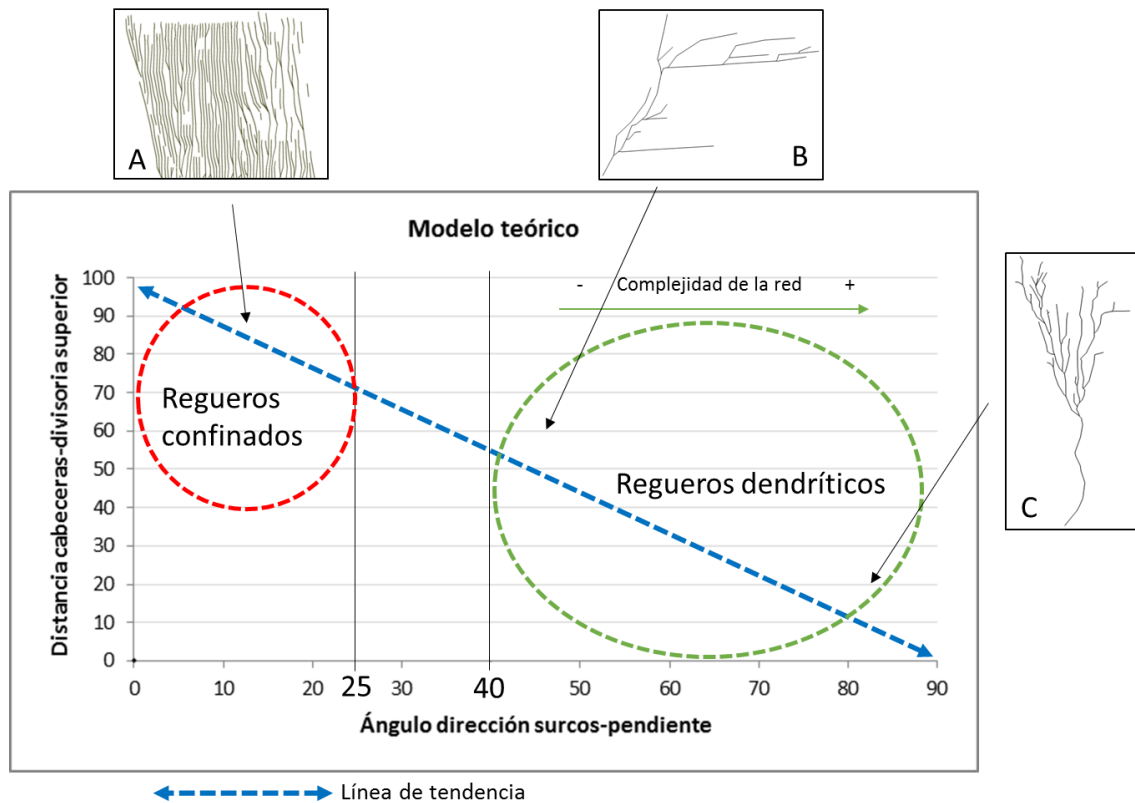


Figura 7.9: Modelo teórico de evolución entre la orientación de los surcos de labranza y la distancia entre la divisoria superior de aguas y las cabeceras según las morfologías estudiadas en los procesos erosivos de ladera.

En ángulos oblicuos es común que se produzcan redes mixtas como la que puede observarse en el ejemplo B de la figura, (caso de Ay2-7). En este caso, en el que el ángulo medio entre los surcos y la pendiente es de 46° , el agua fluye por los surcos llegando a generar incisiones confinadas que posteriormente, por determinadas circunstancias, son capaces de superar el caballón y generar confluencias aguas abajo.

Pese a que se ha descrito la tendencia teórica entre la distancia de las cabeceras a la divisoria superior de aguas y el ángulo existente entre la pendiente y la dirección de los surcos como un proceso continuo, cabe recordar que la erosión se produce por dos procesos diferenciados. Por lo tanto, existe un umbral en el ángulo entre la rugosidad orientada y la pendiente a partir del cual el proceso erosivo ya no es por desbordamiento sino por incisión dentro del propio surco. A partir del ángulo umbral, la pendiente del surco es suficiente para que la velocidad del flujo en el surco, y por ende su energía, pueda superar el esfuerzo cortante crítico e iniciarse una incisión. Aunque con seguridad, dicho ángulo umbral no es un valor concreto, sino un intervalo de ángulos que deben estar relacionado con las características de la precipitación y la pendiente existente sobre el terreno, que también infieren una energía al flujo que puede favorecer la incisión de las cabeceras en unas u otras circunstancias. Este umbral se sitúa, según los datos de este estudio, entre los 40° y los 26° del ángulo que forman la dirección de los surcos de la labor y la máxima pendiente.

En resumen, a partir de los datos y la discusión hasta aquí establecida, se puede afirmar que:

- Los procesos de formación de regueros dendríticos no responden a los procesos hortonianos clásicos de incisión de cabeceras sino que se desencadenan a partir del desbordamiento de los caballones.

- Los procesos de formación de regueros dendríticos se desarrollan en los lugares donde el ángulo entre la dirección de los surcos de labor y la máxima pendiente forma un ángulo de al menos 26° .
- Los procesos de formación de regueros confinados responden a los procesos hortonianos clásicos de incisión de cabeceras. En este caso incidirá una cabecera en el punto en que la energía de la escorrentía superficial supere el esfuerzo cortante crítico en el interior del surco.
- Los procesos de formación de regueros confinados se desarrollan sobre las laderas donde el ángulo entre la dirección de los surcos de labor y la máxima pendiente sea igual o inferior a los 40° .
- El proceso de formación de regueros dendríticos requiere una menor distancia colectora media para desencadenarse frente a los confinados.
- El proceso de formación de regueros dendríticos presenta una menor distancia desde las cabeceras a la divisoria superior de aguas que en el caso de los confinados, con lo cual la erosión afecta a una mayor superficie de cuenca de drenaje.

7.5.2. Influencia de la morfologías de las redes de regueros sobre las tasas de erosión en los procesos erosivos de ladera

Hasta el momento, se han descrito dos procesos erosivos diferenciados, condicionados por la rugosidad orientada, que dan como resultado dos morfologías de redes de regueros: dendrítica y confinada. En este punto, resulta imprescindible determinar cuál de los dos procesos erosivos produce una mayor pérdida de suelo, mayores tasas de erosión.

Las tasas de erosión relacionan el volumen de suelo evacuado en la formación de los regueros y/o cárcavas efímeras con la superficie total de la cuenca de drenaje. En el volumen total de suelo perdido influyen la morfología de las secciones de los canales formados y la longitud de regueros desarrollada.

Una menor superficie afectada por erosión del total de la superficie de la cuenca de drenaje, o lo que es lo mismo, una mayor superficie libre de erosión aguas arriba de las primeras cabeceras, tiende a producir menores tasas de erosión. En análisis anteriores se ha determinado que en las redes confinadas de regueros la superficie libre de erosión, cinturón de no erosión (Horton, 1945) aguas arriba de la primera cabecera, es mayor que en el caso de desarrollo de redes dendríticas.

También resulta esclarecedor observar la longitud total de los canales formados, unido a las secciones características que se desarrollan asociadas a cada una de las morfologías.

El valor *per se* de longitud de los canales no deja de ser un valor descontextualizado que no aporta gran información. Sin embargo, considerando el parámetro de densidad de drenaje, que relaciona la longitud total de los canales con la superficie de la cuenca de drenaje correspondiente, se puede realizar una comparación directa entre las diferentes laderas agrícolas estudiadas y las morfologías de las redes de flujos concentrados en ellas desarrolladas.

Por último, las secciones características de los regueros asociadas a cada una de las morfologías descritas aportan una importante información del volumen de pérdida de suelo. Las secciones de canal están relacionadas con el caudal de descarga, que a su vez está relacionado con la superficie de la cuenca de drenaje. Para el análisis de las secciones de los regueros y su posterior comparación se analizará la Relación Anchura-Profundidad (RAP) de la totalidad de las secciones medidas en campo, intentando determinar diferencias entre las morfologías anteriormente descritas.

Para la comparación de los parámetros anteriormente descritos se han seleccionado aquellos escenarios en los cuales se pudieron caracterizar microcuencas con desarrollo de regueros dendríticos y confinados bajo un mismo evento de precipitación, para eliminar la diferencia en las descargas producidas.

7.5.2.1. Episodio erosivo de Paracuellos del Jarama - Ajalvir

Para una más fácil comparación entre las distintas microcuencas estudiadas en el episodio erosivo de Paracuellos del Jarama- Ajalvir, en la tabla 7.13 se presentan las morfologías en planta de las redes de regueros así como las distintas tasas estimadas de pérdida de suelo, junto con las densidades de drenaje y las Relaciones Anchura – Profundidad (RAP) calculadas.

Tabla 7.13: Resumen de las principales características morfológicas de las redes de regueros así como de los propios canales, junto a las tasas de erosión para las microcuencas estudiadas en el episodio erosión de Paracuellos del Jarama- Ajalvir. D.D.: Densidad de drenaje. RAP: Relación Anchura- Profundidad

Microcuenca	Morfología de la red	Tasa de erosión (Mg ha ⁻¹)	D. D. (m m ⁻²)	Sección media (m ²)	RAP	Microcuenca	Morfología de la red	Tasa de erosión (Mg ha ⁻¹)	D. D. (m m ⁻²)	Sección media (m ²)	RAP
Pj-1	Dendrítica	124.6	0.795	0.0085	1.59	Pj-4	Confinada	66.7	0.441	0.0170	2.41
Pj-2	Dendrítica	181.9	0.797	0.0119	1.65	Aj-1	Mixta	61.7	0.496	0.0065	1.63
Pj-3	Dendrítica	135.3	1.281	0.0067	1.14	Aj-2	Confinada	52.7	0.675	0.0038	1.30
Valores medios dendríticos		147.27	0.933	0.0090	1.46	Valores medios confinados		60.37	0.519	0.0091	1.78

En el caso de Aj-1 se ha definido la morfología en planta como mixta ya que la presencia de una vaguada que cruza la superficie diagonalmente provoca la confluencia de un buen número de canales a favor de la concavidad. El resto de la superficie, que presentaba los surcos de labor a favor de la máxima pendiente, presentó desarrollo de regueros confinados. Es por este hecho que se agrupa con aquellos casos con desarrollo de regueros confinados, por situarse morfológicamente más próxima a estos.

Los resultados muestran diferencias muy acusadas entre las distintas morfologías desarrolladas en el campo. Las tasas de erosión aumentan de forma significativa donde se han desarrollado morfologías dendríticas, llegando a duplicarse la magnitud de las tasas de erosión. Como término medio puede observarse que, en el caso de las microcuencas con desarrollo de regueros dendríticos las tasas de erosión superan siempre los 124 Mg ha⁻¹ mientras que en las que presentan desarrollo de regueros confinados se han cuantificado valores siempre inferiores a 67 Mg ha⁻¹. Si se comparan los casos extremos, las magnitudes de la erosión llega a triplicarse en los casos de las redes de regueros dendríticos respecto a las confinados, 181.9 Mg ha⁻¹ en el caso de Pj-2 por 52.7 Mg ha⁻¹ en el caso de Aj-2.

En la figura 7.10 se representan gráficamente los valores de las tasas de erosión medias de las seis microcuencas de estudio agrupadas según las morfologías erosivas desarrolladas, dendríticas y confinadas, con objeto de observar las diferencias anteriormente descritas.

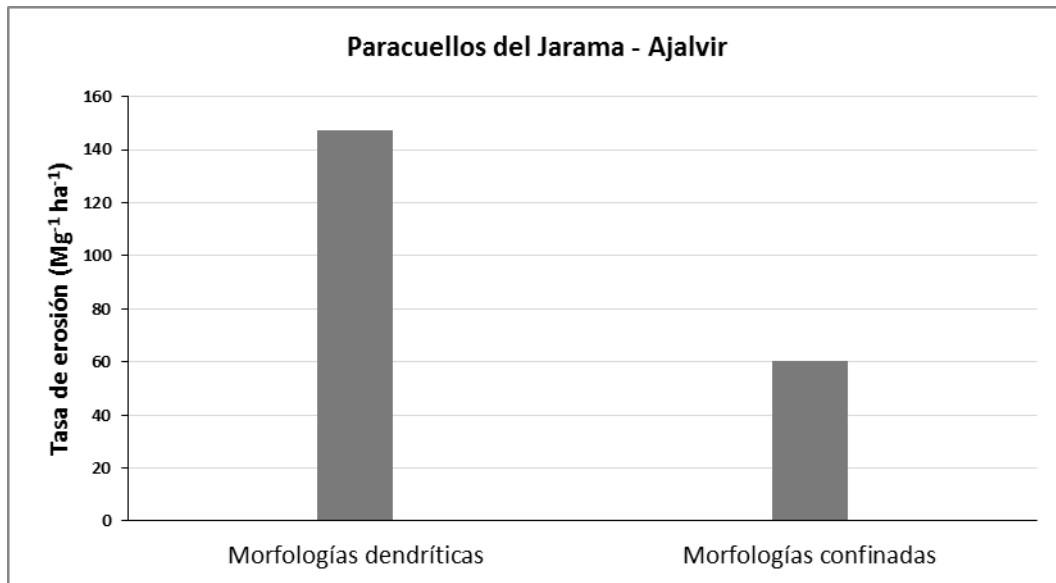


Figura 7.10: Tasa de erosión media en las microcuencas estudiadas en Paracuellos del Jara y Ajalvir. Las microcuencas Pj-1, Pj-2 y Pj-3 tuvieron desarrollo de regueros dendríticos mientras en Pj-4 y Aj-2 el desarrollo de los regueros fue confinado. Aj-1 presentó una red mixta de regueros con mayor importancia de los regueros confinados.

Como se aprecia en la figura 7.11, donde se representa la distribución de las microcuencas de estudio en el plano definido por la densidad de drenaje, en el eje de abscisas, y las tasas de erosión, en el eje de ordenadas, los casos de morfología dendrítica (azules) presentan mayores tasas de erosión y, en este caso, valores de densidad de drenaje superiores a los casos de regueros confinados (rojos). Las líneas de tendencia, en ambos casos, presentan una pendiente negativa, según se incrementa el valor de la tasa de erosión se reduce el valor de la densidad de drenaje, si bien en el caso de los regueros dendríticos la línea de tendencia dista mucho de ajustarse a los tres valores presentes ($R^2 = 0.113$), por lo que no será tomada en cuenta. En el caso de los regueros confinados, la línea de tendencia sí muestra un ajuste a considerar ($R^2 = 0.982$), siempre con las precauciones del bajo número de casos disponibles ($n = 3$). Lo esperable sería que una mayor densidad de drenaje supusiese una mayor tasa de erosión, siempre que las secciones de los canales fuesen iguales en los tres casos. La tendencia mostrada, contraria a lo expuesto como esperable, debe indicar que las secciones de canal compensan el descenso en la densidad de drenaje, como así puede observarse en la tabla 7.13, en la cual a las mayores tasas de erosión les corresponden mayores secciones medias de canal.

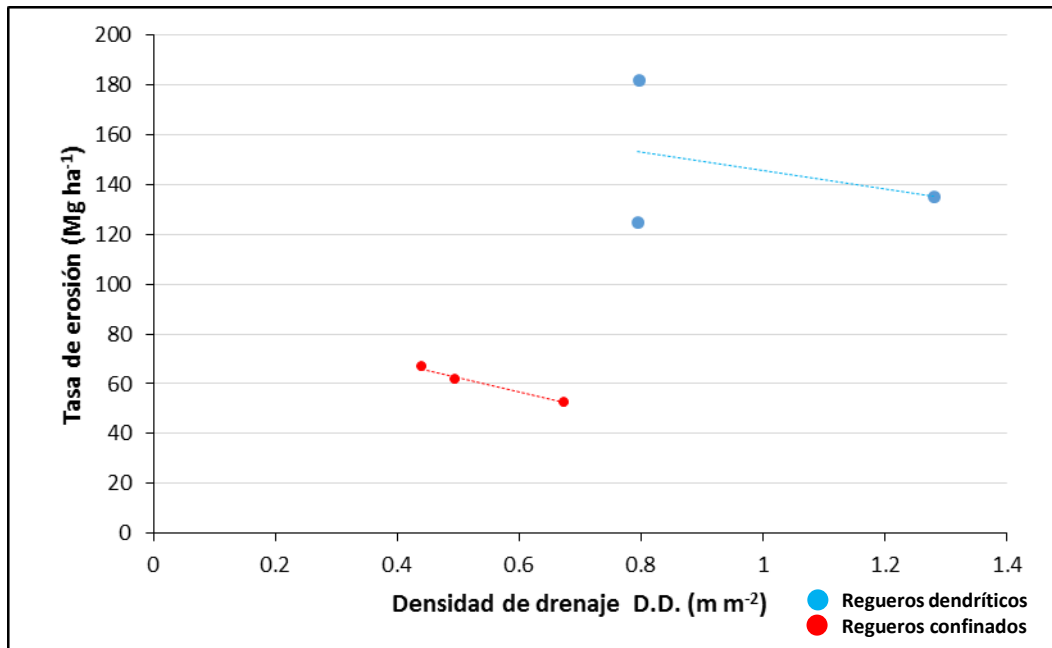


Figura 7.11: Distribución de las distintas microcuencas en función de la densidad de drenaje ((D.D.) (m m^{-2}) y las tasas de erosión (Mg ha^{-1}) asociadas a las mismas.

En la figura 7.7 se presenta gráficamente la distribución de las secciones de canal definidas por la anchura y la profundidad (RAP, Relación Anchura-Profundidad) para cada una de las microcuencas en las que se han desarrollado procesos erosivos de ladera en Paracuellos y Ajalvir.

Como característica general se observa en las gráficas la existencia de nubes de puntos con secciones que prácticamente no superan los 20 cm de profundidad, profundidad a la cual se sitúa el contacto entre los horizontes Ap y Bt₁ (ver tablas 5.21 y 5.22). El horizonte Bt₁ es mucho más competente que el Ap, afectado por el laboreo constante. Esta diferencia de competencias provoca que una vez el reguero se haya desarrollado en profundidad hasta el contacto entre horizontes, al encontrar un horizonte más competente, mayor resistencia a la erosión, requiera de una mayor energía para poder seguir profundizando. Por lo tanto, este contacto entre horizontes dota de mayor competencia al suelo y evita que se erosione en profundidad, favoreciendo, si la energía del flujo lo permitiera, un desarrollo en anchura del canal para poder drenar el caudal de agua correspondiente. Este límite en la profundización de los canales se observa especialmente en los casos de Paracuellos del Jarama,

Por otro lado, en la figura 7.12 se observa también que las secciones se sitúan a ambos lados de la línea que marca la RAP=1 especialmente en los casos Aj-1, Aj-2, redes de regueros confinados, así como en Pj-3, que se trata de una red de regueros dendríticos pero con unas características muy particulares. Esta distribución de los puntos en la gráfica indica la existencia de secciones aproximadamente prismáticas. Además, existe una gran cantidad de puntos muy cercanos al eje de coordenadas indican la presencia de secciones de canal pequeñas en su mayoría.

Entre los seis casos de estudio, se aprecia algo más de dispersión en las nubes de puntos de las microcuencas con desarrollo de regueros dendríticos, especialmente en Pj-2, en las que existe un número de secciones mucho más anchas que profundas, por el efecto anteriormente descrito de la diferencia de competencias entre horizontes. Mayoritariamente se trata de las secciones medidas en la parte baja de la ladera, que son las que mayor caudal reciben y necesitan una mayor sección para cumplir su función. Los casos de Pj-1, Pj-2 y Pj-3 presentan una particularidad: las redes de regueros, aun siendo dendríticas, no presentan confluencias a canales finales únicos, que normalmente se trata de canales finales de desagüe que incrementan

considerablemente la sección al recibir la práctica totalidad del drenaje de la microcuenca. En los casos de Paracuellos se han desarrollado múltiples redes dendríticas de regueros *quasi*-paralelas en las que se aprecia, en cada una, un canal principal bastante rectilíneo que recibe pequeños regueros tributarios con escaso desarrollo. Los regueros principales apenas confluyen entre ellos, provocando muchos puntos diferentes de desagüe en cada microcuenca. Este hecho es especialmente llamativo en el caso de Pj-3, que además, como se ha citado anteriormente, presenta una distribución de los puntos en la gráfica similar a los de las redes confinadas de regueros, más que a los de las dendríticas. Algo menos acentuado es este efecto en los casos de Pj-1 y Pj-2, que presentan un mayor número de confluencias en la parte baja de la ladera. Por ello, en estos casos sí que se aprecia una cierta dispersión de la nube de puntos paralela al eje de abscisas que representa el crecimiento final de las secciones debido a las confluencias. Que las redes de regueros no presenten un mayor número de confluencias en la parte final puede deberse a la falta de cierta concavidad en la parte baja de la ladera que facilitaría este proceso.

En el caso de los regueros confinados, especialmente en el caso de Aj-2, que resulta paradigmático a este respecto, las secciones se mantienen muy regulares a lo largo de toda la ladera, debido a su imposibilidad de crecer por desarrollarse encajados en los surcos de labor, que actúan como microcuencas individuales de drenaje, dividiendo la escorrentía superficial total en cada uno de los surcos y, por ello, limitando el caudal de descarga y con ello el crecimiento de las secciones. Algo diferente en cuanto al desarrollo fue el caso de Pj-4 que, en la parte baja de la ladera, presentó algunas confluencias debido al desbordamiento de los caballones dando lugar a secciones de mayor anchura, como puede verse en la figura 7.7, lo cual explica la mayor dispersión de la nube de puntos en la dirección del eje X.

Según los casos estudiados en Paracuellos del Jarama - Ajalvir, se observa una tendencia a que las redes de regueros dendríticas presenten nubes de puntos menos compactas, con algunas secciones finales mayores por recibir la totalidad de la descarga de la cuenca, lo cual provoca que las nubes de puntos se alarguen en la dirección del eje X. Por el contrario, las redes confinadas, tienden a representarse más compactas, sin grandes incrementos en las secciones aguas abajo debido a la división de los caudales de descarga entre el número de surcos existentes en la ladera.

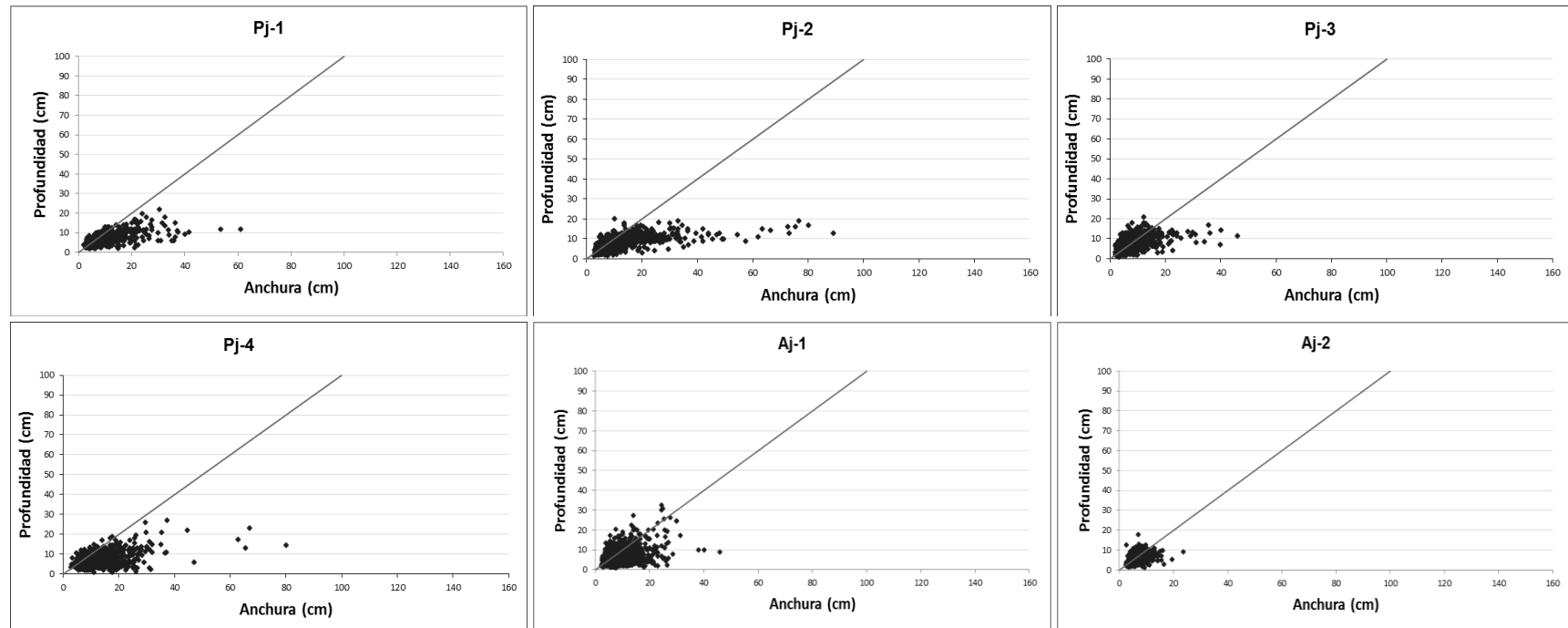


Figura 7.12: Relacion entre la anchura y la profundidad de las secciones de los canales del episodio erosivo de Paracuellos del Jarama y Ajalvir. Pj-1, Pj-2 y Pj-3 desarrollaron morfologias dendriticas, mientras Pj-4, Aj-1 y Aj-2 fueron caracterizadas como redes de regueros confinados. La linea diagonal indica $RAP = 1$

En resumen, en el caso Paracuellos del Jarama – Ajalvir, la diferencia en las tasas de erosión entre ambas morfologías puede explicarse en las diferencias en las densidades de drenaje cuantificadas, muy superiores en los casos de las redes con morfologías dendríticas, ya que no existen diferencias significativas en las secciones medidas en los regueros entre ambas morfologías. Con excepción del caso de Pj-4, que si presenta un importante cinturón de no erosión (Horton, 1945) con el primer reguero a 53.3 m de la divisoria superior de aguas, los casos Aj-1 y Aj-2 no cumplen la tendencia anteriormente citada en la cual las redes confinadas de regueros distancian más la incisión del primer reguero de la divisoria superior de aguas, por lo que tampoco en esta superficie libre de erosión aguas arriba de los regueros puede encontrarse una explicación, en este caso, a la diferencia en las tasas de erosión.

7.5.2.2. Episodio erosivo de Villarrubia de los Ojos

La tabla 7.14 presenta las morfologías en planta de las redes de regueros estudiadas en Villarrubia, así como las distintas tasas de pérdida de suelo calculadas, junto con las densidades de drenaje y las Relaciones Anchura – Profundidad (RAP).

Las tasas de erosión presentan una importante variabilidad entre las distintas microcuencas. En el caso de las redes dendríticas de regueros las tasas de erosión varían entre los 566.4 y los 727.9 Mg ha⁻¹. Más acusada es esta variabilidad en las microcuencas con desarrollo de regueros confinados, en donde las tasas varían entre los 157.1 y los 916.6 Mg ha⁻¹.

Tabla 7.14: Resumen de las principales características morfológicas de las redes de regueros así como de los propios canales, junto a las tasas de erosión para las microcuencas estudiadas en el episodio erosión de Villarrubia de los Ojos. D.D.: Densidad de drenaje. RAP: Relación Anchura-Profundidad

Microcuenca	Morfología de la red	Tasa de erosión (Mg ha ⁻¹)	D. D. (m m ⁻²)	RAP	Microcuenca	Morfología de la red	Tasa de erosión (Mg ha ⁻¹)	D. D. (m m ⁻²)	RAP
Vo1-1	Dendrítica	568.7	0.290	2.88	Vo-2	Confinada	643.8	0.85	2.54
Vo1-2	Dendrítica	727.9	0.446	3.14	Vo3-1	Confinada	253.8	0.23	2.82
Vo1-3	Dendrítica	566.4	0.359	1.73	Vo3-2	Confinada	916.6	1.19	2.58
					Vo3-3	Confinada	157.1	0.21	2.78
Dendríticos		621	0.368	2.58	Confinados		492.8	0.43	2.68

En la figura 7.13 se representan gráficamente los valores de las tasas de erosión de las siete microcuencas de estudio agrupadas según las morfologías erosivas desarrolladas, dendríticas y confinadas. Por lo tanto, por un lado se han asociado los procesos erosivos estudiados en Vo-1 y por otro los estudiados en Vo-2 y Vo-3.

A primera vista llama la atención que en Villarrubia de los Ojos las tasas de erosión calculadas son excepcionalmente altas, con seguridad este hecho está vinculado a que el desencadenante del episodio erosivo es un evento de precipitación extrema caracterizada como supercélula convectiva y a unas pendientes muy elevadas, por encima del 20%. Siendo excepcionalmente altas las tasas de erosión calculadas, se aprecia una importante diferencia entre las tasas de erosión medias en las microcuencas con desarrollo de redes dendríticas de regueros y las microcuencas con desarrollo de redes de regueros confinados. En el caso de Villarrubia de los Ojos, la erosión media sobre las laderas donde se han desarrollado redes dendríticas es 1.25 veces la tasa de erosión asociada a las microcuencas con desarrollo de regueros confinados.

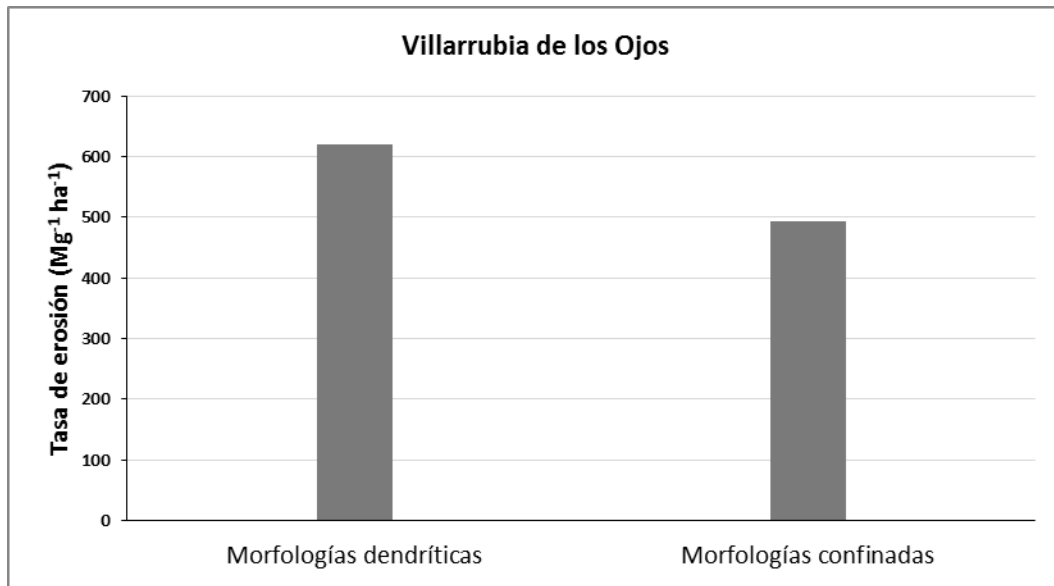


Figura 7.13: Tasas de erosión asociadas a las microcuencas de Villarrubia de los Ojos en función de las morfologías de regueros desarrolladas, dendríticas y confinadas.

En la figura 7.14, en la que se representa la distribución de las microcuencas de estudio en el plano definido por la densidad de drenaje y las tasas de erosión, puede observarse la variabilidad anteriormente descrita, especialmente entre las microcuencas con desarrollo de regueros confinados (en rojo). En este caso se han caracterizado dos microcuencas con desarrollo de regueros confinados con valores de densidad de drenaje muy superiores al resto. Este hecho ha dado lugar a que en estos dos casos las tasas de erosión sean incluso superiores a las de las microcuencas con desarrollo de regueros dendríticos.

Cuando la dirección de los surcos de labor se orienta a favor de la máxima pendiente, casos en los que se produce el desarrollo de regueros confinados, el número de canales potenciales es equivalente al número de surcos, y la longitud potencial de esos canales es equivalente a la longitud total del surco. Por lo tanto, si las incisiones se producen muy cerca de la cabecera, como sucede en algunos de estos casos, la superficie afectada por regueros es realmente alta, quedando solo los caballones como superficies libres de erosión.

Pese a la variabilidad dentro de los resultados de las microcuencas con desarrollo de regueros confinados, puede observarse que las líneas de tendencia de la figura 7.14, siempre con las reservas que produce la obtención de líneas de tendencia con series de datos tan pequeñas ($n=3$ y $n=4$ para las morfologías dendríticas y confinadas, respectivamente) pero con coeficientes de determinación (R^2) próximos a 1 (0.8 y 0.99 para las morfologías dendríticas y confinadas, respectivamente), muestran que las microcuencas en las que se desarrollan regueros dendríticos, a iguales valores de densidad de drenaje, tienden a presentar una mayor pérdida de suelo que en los casos de las microcuencas con regueros confinados.

En este caso las líneas de tendencia son opuestas a las obtenidas en el episodio erosivo de Paracuellos del Jarama-Ajalvir, ya que, aquí, presentan pendientes positivas. Este hecho vincula una mayor densidad de drenaje con una mayor tasa de erosión, lo cual puede afirmarse que es más esperable, que lo sucedido en el episodio de estudio anterior, donde se invertía la tendencia. Sin embargo, como ocurría en Paracuellos del Jarama-Ajalvir, la línea de tendencia que representa los casos de regueros dendríticos se sitúa en valores de tasa de erosión superiores al caso de los confinados.

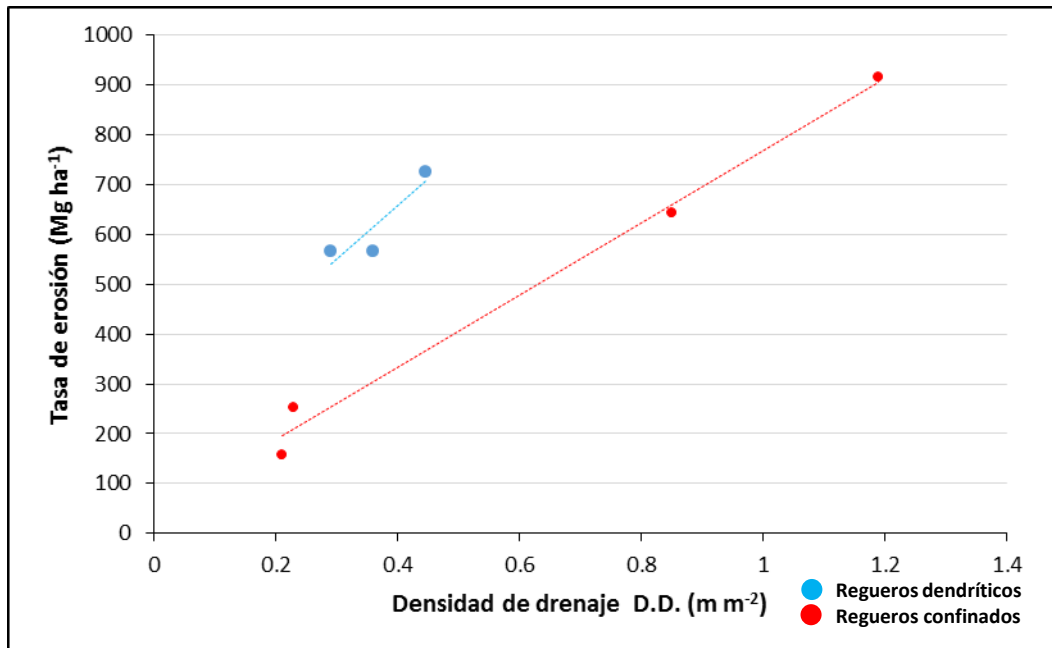


Figura 7.14: Distribución de las distintas microcuencas en función de la densidad de regueros y las tasas de erosión asociadas a las mismas.

Llama la atención que, no existiendo diferencias considerables en las características del suelo entre los casos de estudio de Vo-2 y Vo-3 (ver tabla 5.14) y apenas una pequeña diferencia en los valores de pendiente media, que es algo superior en el caso de Vo-2 (ver tabla 5.17), se hayan producido diferencias tan importantes en los valores de las tasas de erosión entre las cuatro microcuencas con surcos a favor de la máxima pendiente. Una posible explicación radica en la alta pedregosidad existente sobre estos campos de cultivo. La disposición de los fragmentos de roca sobre el suelo pudo proteger de una manera más eficiente su superficie en unos casos que en otros.

En la figura 7.15 se presenta gráficamente la distribución de las secciones de canal definidas por la anchura y la profundidad para cada una de las microcuencas estudiadas. Puede apreciarse que la práctica totalidad de las secciones estudiadas se sitúan a la derecha de la línea que indica el valor de $RAP = 1$, lo que indica que son más anchas que profundas. Es destacable que las pocas secciones que presentan una mayor profundidad que anchura se localizan en las redes dendríticas, aquellas que ven limitado su crecimiento lateral por las dimensiones del surco en el cual se desarrollan.

Se aprecia la existencia de un límite en profundidad, mucho más marcado en el caso de los regueros confinados. En estos casos se sitúa en torno a 40 cm. En el caso de los regueros dendríticos no parece apreciarse un límite tan nítido en profundidad, llegando a presentar un buen número de secciones con hasta 60 cm de profundidad y algunas mayores.

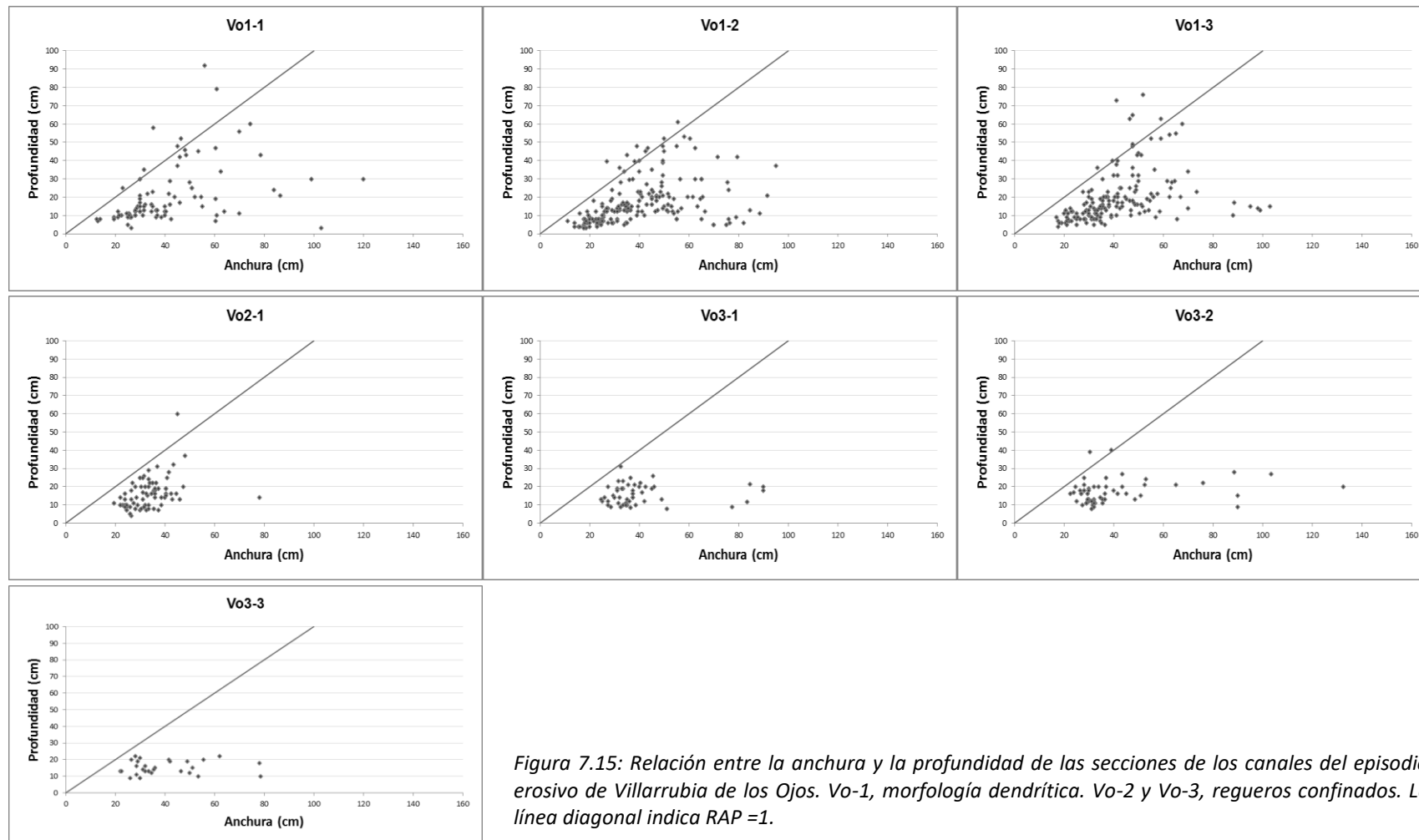


Figura 7.15: Relación entre la anchura y la profundidad de las secciones de los canales del episodio erosivo de Villarrubia de los Ojos. Vo-1, morfología dendrítica. Vo-2 y Vo-3, regueros confinados. La línea diagonal indica $RAP = 1$.

Esta diferencia en las profundidades alcanzadas en función de las morfologías, que se traslada a una mayor pérdida de suelo local, tiene dos razones. Por un lado, mientras los regueros confinados drenan cada uno el propio surco en el que se encajan, las redes de regueros dendríticos drenan una superficie mucho mayor, en concreto la totalidad de la cuenca en la que se han desarrollado. En consecuencia, el caudal de los regueros dendríticos es mucho mayor que en los regueros confinados, lo cual supone mayor energía en el flujo y por ende, una mayor capacidad para incidir en profundidad y desarrollar secciones mayores.

A este hecho hay que añadir las características del episodio de precipitación que desencadena la erosión. En el caso de Villarrubia de los Ojos se trató de una supercélula convectiva, una lluvia torrencial, que aportó un gran volumen de agua con una gran energía sobre las laderas, que además presentan una importante pendiente, lo que redunda en la capacidad erosiva del flujo. En este caso, la energía de la escorrentía superficial fue capaz de profundizar sobre el suelo sin encontrar un límite más allá del equilibrio del cauce respecto a la descarga producida. Como en el caso de los regueros confinados el volumen de agua de la escorrentía superficial total se reparte entre el número de surcos existente, la descarga en cada uno de los surcos es mucho menor y, por tanto, el caudal tendrá menor energía, impidiendo alcanzar mayores profundidades de incisión, por ello las profundidades máximas en las secciones de los regueros confinados se sitúan en el entorno de los 40 cm, mientras en el caso de los regueros dendríticos llegan a superar los 80 cm en algunas secciones, con lo implicación que ello tiene en los volúmenes de suelo perdido.

Sin embargo, ante un volumen tan importante de descarga, en el caso de los regueros confinados, la energía del flujo supera el esfuerzo cortante crítico sin necesitar grandes distancias colectoras, por lo tanto, en posiciones cercanas a la divisoria superior de agua, como sucedió en dos de las cuatro microcuencas de Villarrubia, en las que la primera incisión apareció a menos de 7 m de la divisoria superior (ver tabla 5.17). A este proceso hay que sumarle que un flujo superficial tan importante como el que se produce en un evento de precipitación de estas características hace que la erosión remontante también sea muy importante, ya que una vez incidido el reguero, el salto de agua que se produce en la cabecera del mismo acelera el proceso de erosión remontante, acercando, aún más, las cabeceras a la divisoria superior de aguas. Por lo tanto, al modelo teórico anteriormente planteado en el que las morfologías confinadas de los regueros producían una mayor distancia entre las cabeceras y la divisoria superior, es conveniente añadir que cuanto mayor sea la descarga más se acercarán dichas cabeceras a la divisoria superior de aguas, como ocurre en este episodio erosivo.

En resumen, nuevamente las tasas de erosión medias son mayores en los casos de los regueros dendríticos que en los confinados, aunque se aproximan más debido a las características de la precipitación. Sin embargo, este hecho no es excluyente con que, en algunas circunstancias, las tasas puedan igualarse entre ambas morfologías de desarrollo de regueros, e incluso ser superiores en los casos con desarrollo de regueros confinados. Esto se produce porque pese a que las secciones medias de los regueros confinados son notablemente menores que las de los regueros dendríticos, el hecho de que las cabeceras de los regueros se acerquen a la divisoria superior de aguas, disminuyendo mucho la superficie correspondiente al cinturón de no erosión de Horton (1945), produce un aumento del valor de la densidad de drenaje, que compensa el desarrollo de secciones menores en estos casos.

7.5.2.3. Episodio erosivo de Arroyomolinos

Para el análisis se han considerado únicamente las microcuencas de Arroyomolinos 1, ya que en este campo de cultivo se caracterizaron tanto una red de regueros dendríticos, caso de Ay1-1, como dos microcuencas con desarrollo de regueros confinados, Ay1-2 y Ay1-3, lo que permite una comparación directa entre las morfologías. Los casos de Arroyomolinos 2 solo presentan desarrollos de redes dendríticas con características muy diferenciadas, por lo que no se incluirán en la comparativa actual.

En la tabla 7.15 se indican las morfologías en planta de las redes de regueros consideradas, así como las distintas tasas estimadas de pérdida de suelo, junto con las densidades de drenaje y las Relaciones Anchura – Profundidad (RAP) calculadas.

Tabla 7.15: Resumen de las principales características morfológicas de las redes de regueros así como de los propios canales, junto a las tasas de erosión para las microcuencas estudiadas en el episodio erosión de Arroyomolinos. D.D.: Densidad de drenaje. RAP: Relación Anchura-Profundidad.

Microcuenca	Morfología de la red	Tasa de erosión (Mg ha ⁻¹)	D. D. (m m ⁻²)	RAP	Microcuenca	Morfología de la red	Tasa de erosión (Mg ha ⁻¹)	D. D. (m m ⁻²)	RAP
Ay1-1	Dendrítica	68.2	0.057	4.41	Ay1-2	Confinada	40.7	0.394	2.93
					Ay1-3	Confinada	22.6	0.282	1.90
					Confinados		31.6	0.339	2.41

Puede observarse una muy importante diferencia entre las tasas de erosión producidas en Ay1-1, red de regueros dendríticos, 68.2 Mg ha⁻¹, frente a las de Ay1-2 y Ay1-3, redes confinadas, cuyo valor medio se ha determinado en 31.6 Mg ha⁻¹, algo más del doble de erosión en el caso de los regueros dendríticos (figura 7.17).

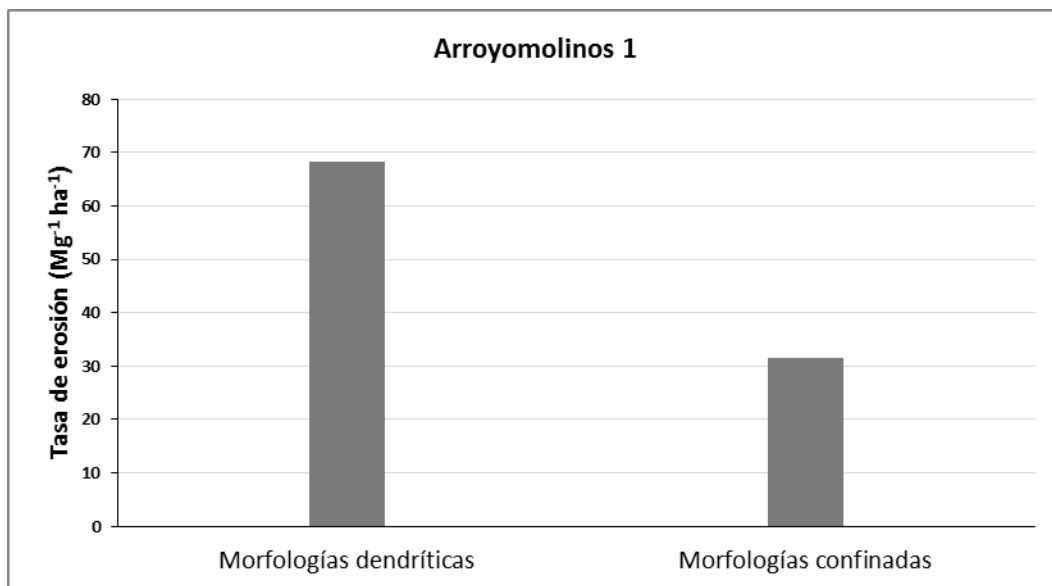


Figura 7.17: Tasa de erosión media en las microcuencas estudiadas en Arroyomolinos 1 en función de las morfologías desarrolladas.

En la figura 7.18, donde se representa la distribución de las microcuencas de estudio en el plano definido por la densidad de drenaje, en el eje de abscisas, y las tasas de erosión, en el eje de ordenadas, puede volver a observarse que el caso con morfología dendrítica (en azul) presenta una mayor tasa de erosión que, sin embargo, no se corresponde con una mayor densidad de drenaje, que era lo que hasta este momento se había observado como tendencia en los

episodios de estudio anteriores como tendencia general. En este caso, la densidad de drenaje es muy inferior respecto a los casos de regueros confinados (en rojo).

Por otro lado, la línea de tendencia en el caso de los regueros confinados, considerando el dato como meramente indicativo ya que se obtiene exclusivamente a partir de dos valores, presenta una pendiente positiva, al igual que en el análisis equivalente de Villarrubia de los Ojos (figura 7.14), lo cual indica que a un mayor valor de la densidad de drenaje le corresponde una mayor tasa de erosión.

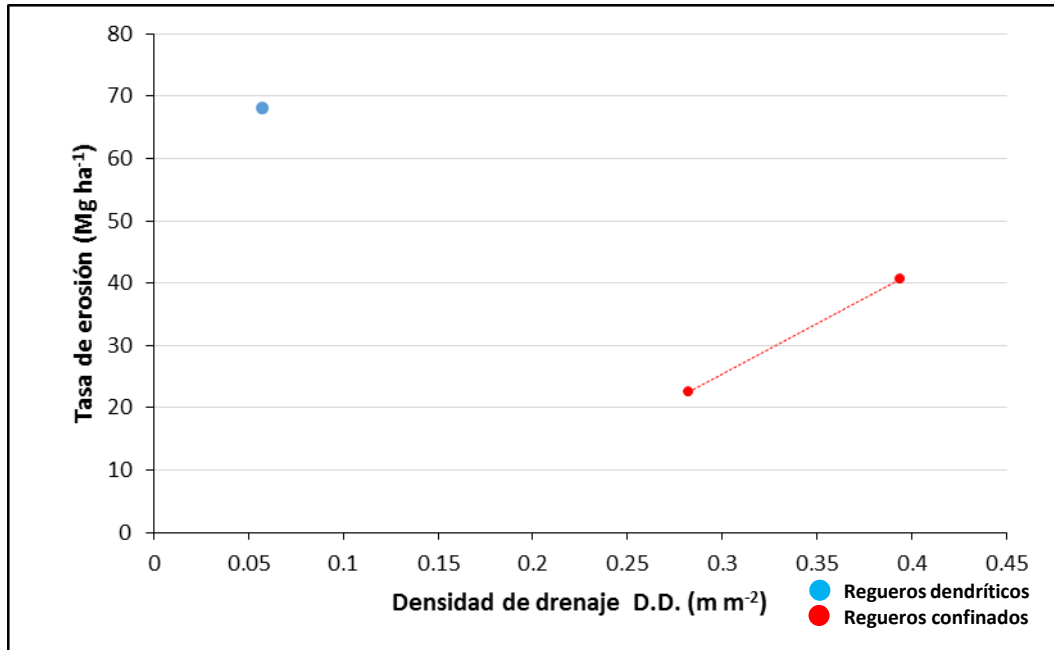


Figura 7.18: Distribución de las distintas microcuencas en función de la densidad de drenaje y las tasas de erosión asociadas a las mismas.

Considerando esta importante diferencia en la densidad de drenaje entre las redes dendríticas y confinadas, la diferencia de tasas de erosión en Arroyomolinos 1 solo puede justificarse a partir de una importante diferencia en las secciones de los canales. Para determinar este supuesto, en la figura 7.19 se presenta gráficamente la distribución de las secciones de canal definidas por la anchura y la profundidad para los casos de Ay1-1, regueros dendríticos y Ay1-2 y Ay1-3, regueros confinados. Observando las gráficas puede apreciarse que la práctica totalidad de las secciones estudiadas se sitúan a la derecha de la línea que indica el valor de $\text{RAP} = 1$, lo que indica que son más anchas que profundas.

También es apreciable la diferente dispersión de la nube de puntos existente entre Ay1-1 y los casos de regueros confinados. En los casos de los regueros confinados, Ay1-2 y Ay1-3, la dispersión de la nube de puntos es muy pequeña, situándose la mayoría de los puntos muy próximo al origen de coordenadas, y las mayores anchuras de los canales apenas alcanzan los 30 cm en algunas secciones, lo cual indica una escasa variación en las secciones aguas abajo, mínimo crecimiento de las secciones con lo que se limita el volumen de suelo desalojado.

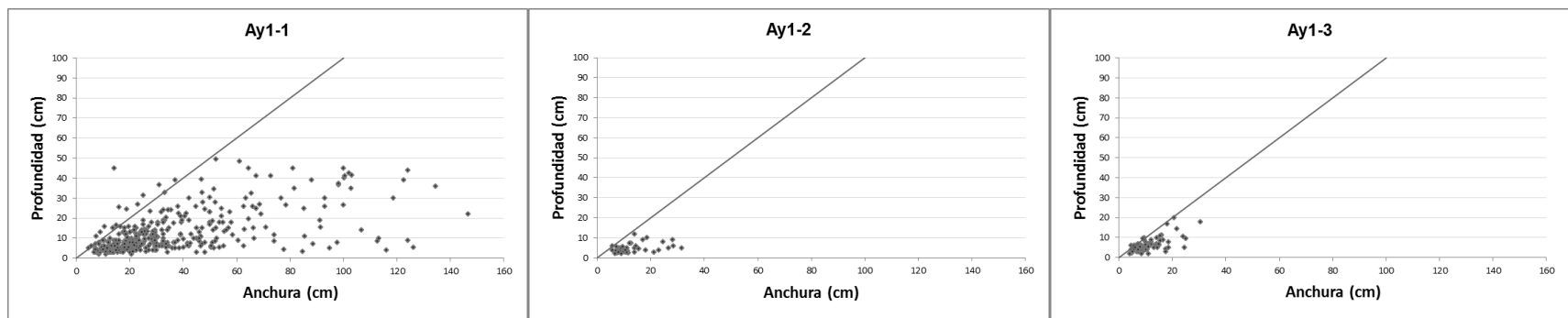


Figura 7.19: Relacion entre la anchura y la profundidad de las secciones de los canales del episodio erosivo de Arroyomolinos 1. La línea diagonal indica $RAP = 1$.

Por el contrario, en Ay1-1, red dendrítica de regueros, las secciones son mucho más anchas que profundas, llegando algunas de ellas a superar el metro de anchura. La dispersión de la nube de puntos es muy importante lo que indica una evolución en el crecimiento de las secciones aguas abajo, según van produciéndose las confluencias.

Respecto al análisis de las profundidades, en las microcuencas con desarrollo de regueros confinados se evidencia un límite en la profundidad de los canales en el entorno de los 20 cm, profundidad en la cual se ha establecido el límite inferior del horizonte Ap (ver tabla 5.4). Una vez que la incisión alcanza dicha profundidad encuentra una competencia mayor en las características del suelo y la energía del flujo no tiene capacidad para seguir profundizando. Por el contrario, en el caso de Ay1-1 se han medido secciones con profundidades muy superiores, hasta los 60 cm. Se trata de una microcuenca con una superficie mucho mayor, lo cual está relacionado con un mayor caudal de descarga, directamente relacionado con una mayor energía del flujo y, por tanto, una mayor capacidad erosiva. Además, la propia naturaleza dendrítica de la red conlleva un incremento de las secciones de los canales aguas abajo, según se van produciendo confluencias, aumentando en mayor o menor medida el caudal y, con ello, la energía. Esta arquitectura de la red dendrítica de regueros hace que, en las proximidades del lugar de desagüe de la cuenca, se desarrollen regueros de dimensiones notables, que en este caso presentan secciones de más de 50 cm de profundidad y más de 1 m de anchura.

A todo ello se suma que en Ay1-1 la incisión del primer reguero se produjo a 12.68 m, mientras que en Ay1-2 y Ay1-3 lo hizo a 19.59 y 18.65 m, respectivamente. Por lo tanto, los patrones de erosión de regueros confinados, condicionados por la dirección de los surcos de labor a favor de la pendiente o próximos a ella, provocan, en este caso, que las cabeceras se alejen de las divisorias, como era de esperar observando el marco teórico anteriormente planteado.

En resumen, como en los casos anteriores, sobre las laderas donde se desarrollaron morfologías dendríticas de regueros, las tasas de erosión medias fueron muy superiores a aquellas cuencas de drenaje donde la morfología erosiva desarrollada fue de regueros confinados. En este caso la relación es de más del doble de tasa de erosión para las redes dendríticas de regueros frente a los confinados. Pese a que la densidad de drenaje de los regueros confinados es superior a la de las redes dendríticas de regueros, la mayor pérdida de suelo se produce debido a una importante diferencia en los tamaños de las secciones de los regueros dendríticos. De esta manera se compensa la importante diferencia existente en las densidades de drenaje, que es muy alta en el caso de los regueros confinados respecto a los dendríticos.

7.5.2.4. Episodios erosivos de Rielves, Cebolla y Pedro Muñoz

Para completar el análisis planteado hasta el momento y dotarlo de mayor robustez, de la totalidad de los episodios erosivos presentados en el apartado 5.2.5.: Rielves, Cebolla, Pedro Muñoz, Valdepeñas, Hormigos y Zorreras, se han tomado, nuevamente, aquellos que presentaron al menos un escenario con desarrollo de cada una de las morfologías de regueros descritas: dendríticas y confinadas, de tal modo que se pueda hacer una comparación directa de los mismos, excluyendo cualquier distorsión asociada a las características de la precipitación. Los episodios erosivos de Rielves, Cebolla y Pedro Muñoz son los tres que cumplen dichos requisitos.

En el caso de Rielves, (De Alba, 1998) se estudiaron cuatro microcuencas, tres de ellas con desarrollo de regueros confinados y una cuarta con desarrollo de regueros dendríticos; mientras que, tanto en Cebolla como en Pedro Muñoz, se caracterizaron 2 microcuencas en cada uno de los emplazamientos, una con desarrollo de regueros dendríticos y otra con regueros confinados.

En todos los casos se dispone de las tasas de erosión asociadas al evento erosivo junto a la descripción de la morfología de las redes de regueros (Memoria Técnica del Informe Final del Proyecto MANERO, 2008). En los casos de los episodios de Pedro Muñoz y Cebolla no se dispone de información sobre la longitud total de los regueros ni sobre cada una de las secciones tomadas en campo. No sucede lo mismo con el episodio erosivo de Rielves que se encuentra descrito con detalle en De Alba (1998).

7.5.2.4.1. *Episodio erosivo de Rielves (Toledo)*

En la tabla 7.16 se presentan las morfologías en planta de las redes de regueros así como las distintas tasas estimadas de pérdida de suelo, junto con las densidades de drenaje (De Alba, 1998). Conviene recordar que las microcuencas Ri-1 y Ri-2 se sitúan en la misma ladera agrícola, que se ha denominado Finca Rielves 1, mientras Ri-3 y Ri-4, se sitúan en otra ladera agrícola diferente, denominada Finca Rielves 2.

Tabla 7.16: Tasas de erosión para las microcuencas estudiadas en el episodio erosivo de Rielves, junto a la morfología en planta de las redes de regueros y las densidades de drenaje (De Alba, 1998)

Microcuenca	Morfología de la red	Tasa de erosión (Mg ha ⁻¹)	D. D. (m m ⁻²)	RAP	Microcuenca	Morfología de la red	Tasa de erosión (Mg ha ⁻¹)	D. D. (m m ⁻²)	RAP
Ri-1	Dendrítica	922.5	0.356	2.68	Ri-2	Confinada	274.0	0.166	2.21
					Ri-3	Confinada	145.4	0.328	1.83
					Ri-4	Confinada	374.7	0.443	3.32
					Confinados		264.7	0.312	2.45

Los resultados muestran diferencias muy acusadas entre las distintas morfologías desarrolladas. La tasa de erosión mayor se produjo en Rielves 1, morfología dendrítica, llegando a alcanzar los 922.5 Mg ha⁻¹. En el caso de las microcuencas con regueros confinados el valor máximo de la tasa de erosión fue de 374.7 Mg ha⁻¹, caso de Ri-4, mientras que en Ri-3, valor mínimo, “tan solo” se alcanzaron los 145.4 Mg ha⁻¹. Si se comparan las tasas medias de erosión para cada una de las morfologías en planta de regueros descritas se puede afirmar que, en este caso, la morfología dendrítica produce una pérdida de suelo más de tres veces superior que las morfologías confinadas.

El caso de Ri-2 ha sido clasificado como una red de regueros confinados, ya que la dirección de los surcos de la labor es a favor de la máxima pendiente y los regueros se desarrollan profundizando los surcos de labranza. Si bien, la microcuenca presenta una morfología en forma de V que ha favorecido que los diferentes pases de labor no sean paralelos sino que se solapen en la parte inferior de la ladera, de tal manera que siendo una red de regueros confinados presenta un mayor número de capturas de unos canales por otros debido a la propia distribución de los surcos que condicionan dicha red. Este hecho provoca un crecimiento de las secciones de los regueros aguas abajo, si bien de una forma moderada.

En la figura 7.20 se representan gráficamente los valores medios de las tasas de erosión de las cuatro microcuencas de estudio agrupadas según las morfologías erosivas desarrolladas. Al igual que en el caso de Villarrubia de los Ojos, llama la atención que en el episodio erosivo de Rielves las tasas de erosión calculadas son excepcionalmente altas. Como en el caso de Ciudad Real, las mismas están vinculadas a un evento extremo de precipitación, 70 mm en apenas 40 minutos, aunque en este caso las pendientes son notablemente inferiores al caso de Villarrubia: 9.8, 8.3, 17 y 14.5% en Ri-1, Ri-2, Ri-3 y Ri-4, respectivamente.

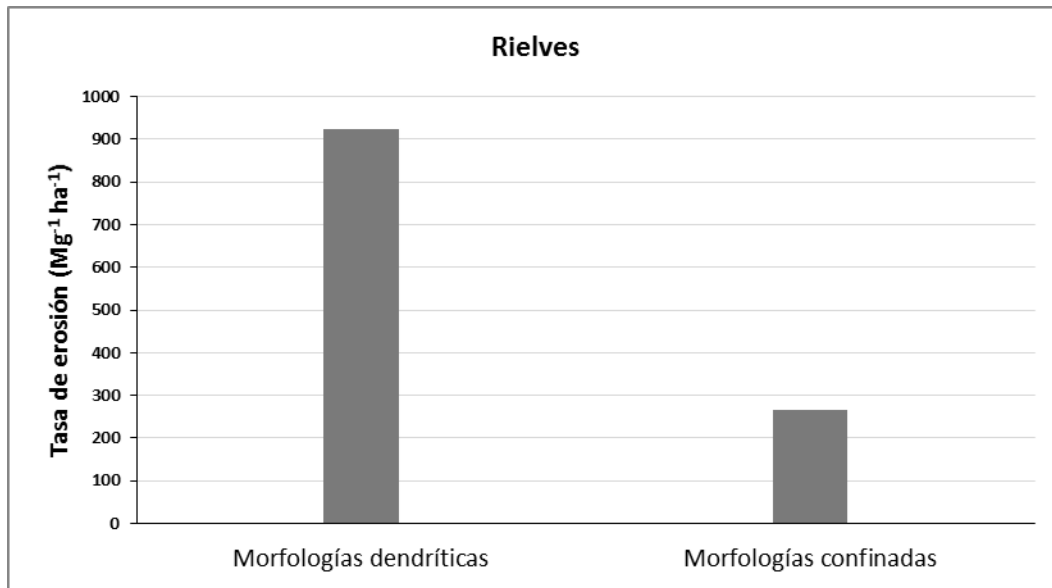


Figura 7.20: Tasa de erosión en las microcuencas estudiadas en Rielves. Las microcuencas Ri-2, Ri-3 y Ri-4 tuvieron desarrollo de regueros confinados, mientras en Ri-1 el desarrollo de los regueros fue dendrítico.

En la figura 7.21, en la que se representa la distribución de las microcuencas de estudio en el plano definido por la densidad de drenaje y las tasas de erosión, puede observarse que las tres microcuencas con desarrollo de regueros confinados (en rojo) presentan una amplia variabilidad en los valores de densidad de drenaje, desde 0.16 a 0.44 m m⁻². Valores que comparativamente con la densidad de drenaje de la red de regueros dendríticos (en azul), 0.356 m m⁻², no presentan diferencias significativas.

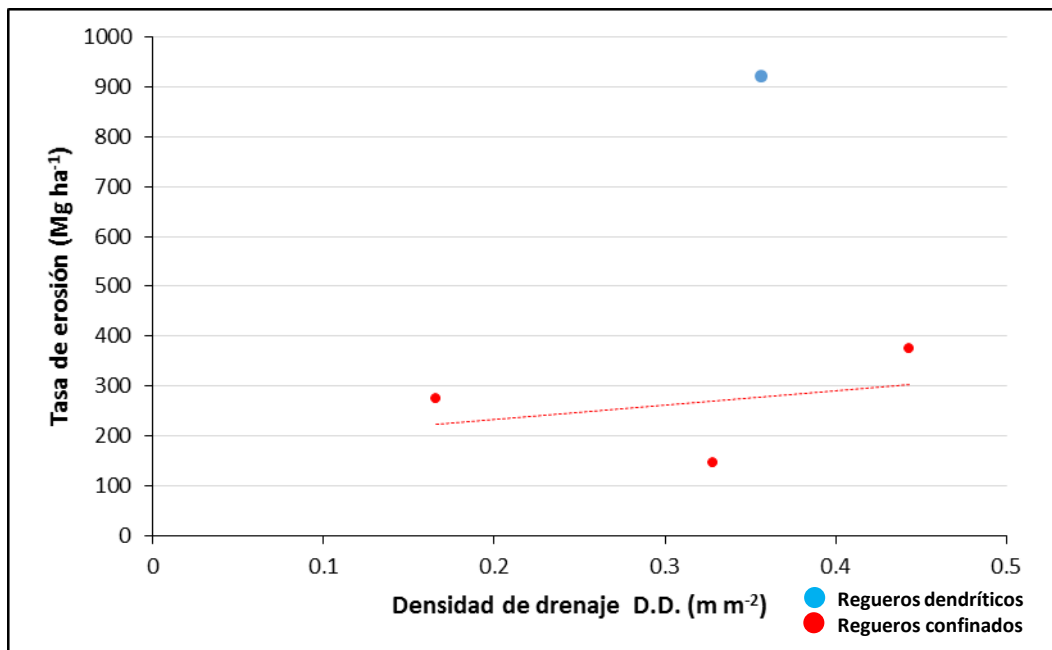


Figura 7.21: Distribución de las distintas microcuencas en función de la densidad de drenaje ((D.D.) (m m⁻²) y las tasas de erosión (Mg ha⁻¹) asociadas a las mismas.

En la figura 7.22 se presenta gráficamente la distribución de las secciones de canal definidas por la anchura y la profundidad (RAP, Relación Anchura-Profundidad) para cada una de las cuatro microcuencas en las que se han desarrollado procesos erosivos de ladera en Rielves.

Observando las cuatro gráficas, puede apreciarse que la práctica totalidad de las secciones estudiadas se sitúan a la derecha de la línea que indica el valor de $RAP = 1$, lo que indica que son más anchas que profundas.

Por otro lado, se aprecia la existencia de un límite en profundidad en los cuatro casos, si bien en la Finca Rielves 1, Ri-1 y Ri-2, dicho límite se sitúa en los 50 cm, mientras en la Finca Rielves 2, Ri-3 y Ri-4, el límite tan solo alcanza los 25 cm. Una vez que la incisión alcanza dicha profundidad encuentra una competencia mayor en las características del suelo y la energía del flujo no es suficiente para seguir profundizando, iniciando en ese momento un aumento de la anchura de los regueros para poder evacuar el caudal. Esta diferencia entre ambas fincas debe estar relacionada con diferencias en las características del suelo ya que no se dispone de la descripción de los perfiles del suelo para asegurarlo.

Las secciones de canal caracterizadas en Rielves presentan sobre la gráfica (figura 7.22) una importante dispersión según el eje X, con la excepción del Ri-3. Este hecho es esperable, según lo observado en los casos anteriores, en el caso de Ri-1, ya que se trata de una red de regueros dendríticos, cuyas confluencias hacen aumentar la sección del canal aguas abajo, sino en profundidad, al encontrar un límite en la competencia de los horizontes, si en anchura. Los casos de Ri-2 y Ri-4, pese a ser redes confinadas presentan características particulares que las alejan de ser ejemplos perfectos de modelos confinados y explican los crecimientos de las secciones aguas abajo que pueden observarse en la gráfica. En el caso de Ri-2 la propia forma de la microcuenca provocó una serie de pases de labor solapados en la parte baja de la misma, lo que produjo que aguas abajo se produjesen múltiples capturas entre regueros, aumentando de esta manera las secciones. El resultado de ello es una mayor dispersión en la nube de puntos de la figura 7.22. Respecto a Ri-4, en uno de los lados de la ladera, se produce una modificación en la dirección de las curvas de nivel. Al mantenerse la dirección de la labranza sobre el campo, sobre esta superficie se produce un laboreo oblicuo a la máxima pendiente, que produce convergencia (rotura lateral de caballones) de regueros, lo que redundó en un incremento de las secciones en anchura, que explica la dispersión de la nube de puntos en la dirección del eje X.

Por el contrario, el caso de Ri-3 es un caso de regueros confinados paradigmático. El laboreo es, en este caso, perfectamente paralelo a la máxima pendiente y no hay capturas laterales entre regueros, por lo que el resultado es que las secciones apenas crecen aguas abajo, o lo hacen en menor medida que en los otros tres casos. Por ello, la nube de puntos es mucho más compacta y las secciones no llegan a superar los 40 cm de anchura y los 30 cm en profundidad, produciéndose secciones *quasi* prismáticas.

Por lo que, buscando establecer una comparativa entre ambos modelos erosivos, dendríticos y confinados, se podrían considerar los casos Ri-1 y Ri-3 como paradigmáticos dentro de ambos modelos, y comparando ambos se podrían extraer las diferencias que se producen en los modelos de erosión desarrollados en función de la rugosidad orientada presente sobre la ladera.

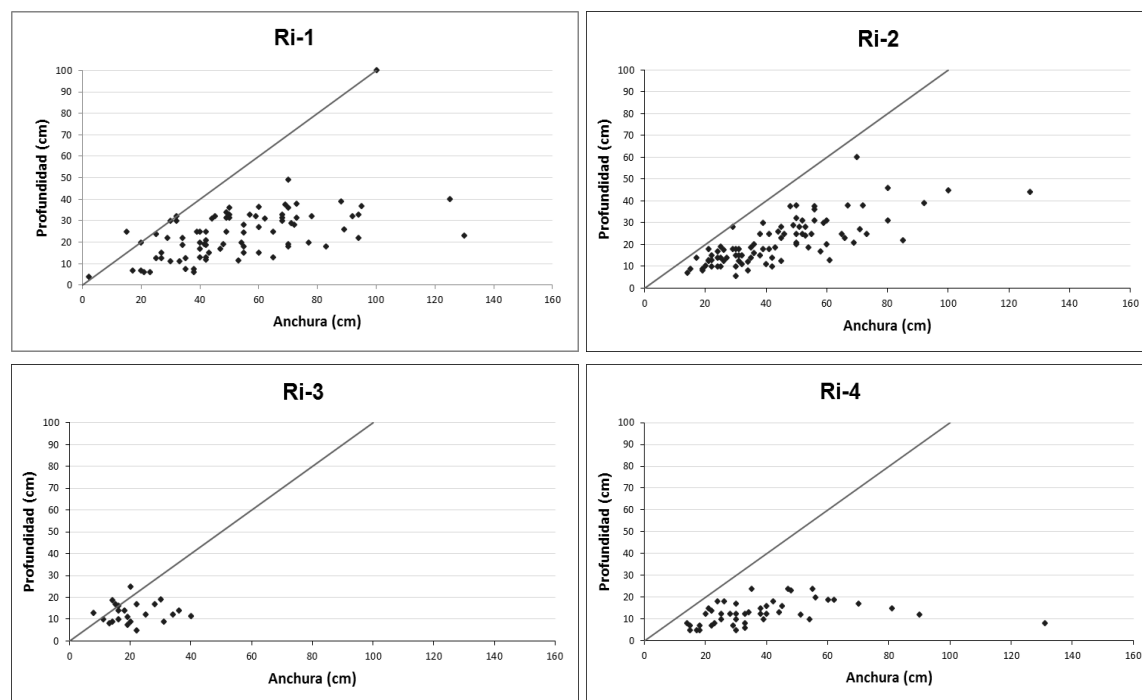


Figura 7.22: Relacion entre la anchura y la profundidad de las secciones de los canales del episodio erosivo de Arroyomolinos 1. La linea diagonal indica $RAP = 1$.

7.5.2.4.2. Episodio erosivo de Cebolla (Toledo)

En el episodio erosivo de Cebolla se caracterizaron dos microcuencas, una con desarrollo de regueros confinados y otra con desarrollo de regueros dendríticos. Junto a esta información se dispone de las tasas de erosión (tabla 7.17) producidas a partir de un evento de precipitación que se produjo en diciembre de 2005 y en el cual, en 48h, se registraron 60 mm. Se estimó un periodo de retorno para el evento desencadenante de la erosión menor de 5 años.

Tabla 7.17: Tasas de erosión para las microcuencas estudiadas en el episodio erosivo de Cebolla, junto a las morfologías en planta de las redes de regueros desarrolladas.

Microcuenca	Morfología de la red	Tasa de erosión (Mg ha^{-1})	Microcuenca	Morfología de la red	Tasa de erosión (Mg ha^{-1})
Ce-1	Dendrítica	83.3	Ce-2	Confinada	3.1

Los resultados muestran diferencias muy acusadas entre las tasas de erosión de las dos morfologías desarrolladas en el campo. Como en los casos anteriores, las tasas de erosión aumentaron de forma significativa donde se desarrollaron morfologías dendríticas. La pérdida de suelo producida por el desarrollo de la red dendrítica de regueros en Cebolla fue más de 25 veces superior a la que se produjo en la microcuenca en la que se desarrollaron regueros confinados (figura 7.23)

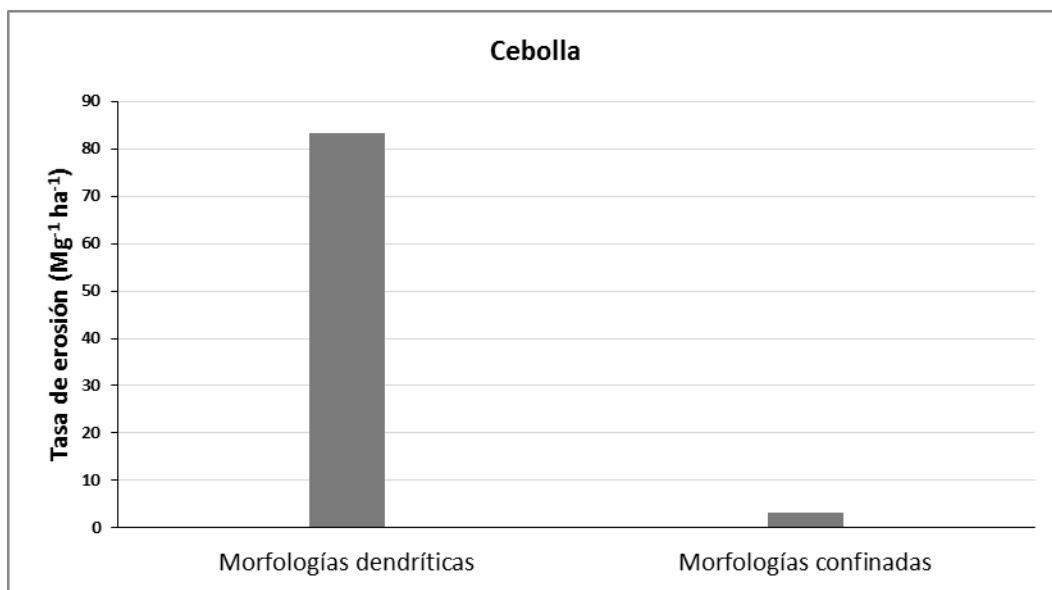


Figura 7.23: Tasa de erosión en las microcuencas estudiadas en Cebolla.

7.5.2.4.3. Episodio erosivo de Pedro Muñoz (Ciudad Real)

En el episodio erosivo de Pedro Muñoz se caracterizaron dos microcuencas, una con desarrollo de regueros confinados y otra con desarrollo de regueros dendríticos. En la tabla 7.18 se presentan las tasas de erosión producidas a partir de un evento de precipitación que se produjo en abril de 2006 y en el cual, en tan solo 75 minutos se registraron 50 mm. El periodo de retorno calculado para el evento de precipitación fue de 8 años.

Tabla 7.18: Tasas de erosión para las microcuencas estudiadas en el episodio erosivo de Pedro Muñoz, junto a las morfologías en planta de las redes de regueros desarrolladas.

Microcuenca	Morfología de la red	Tasa de erosión (Mg ha ⁻¹)	Microcuenca	Morfología de la red	Tasa de erosión (Mg ha ⁻¹)
P-Muñoz1-1	Dendrítica	123.7	P-Muñoz1-2	Confinada	5.5

Los resultados muestran nuevamente diferencias muy acusadas entre las dos morfologías desarrolladas en el campo. Como en los casos anteriores, las tasas de erosión aumentaron de forma significativa donde se desarrollaron morfologías dendríticas. En este caso, la pérdida de suelo donde se desarrollaron regueros dendríticos en Pedro Muñoz fue más de 20 veces superior a la microcuenca en la que se desarrollaron regueros confinados (figura 7.24)

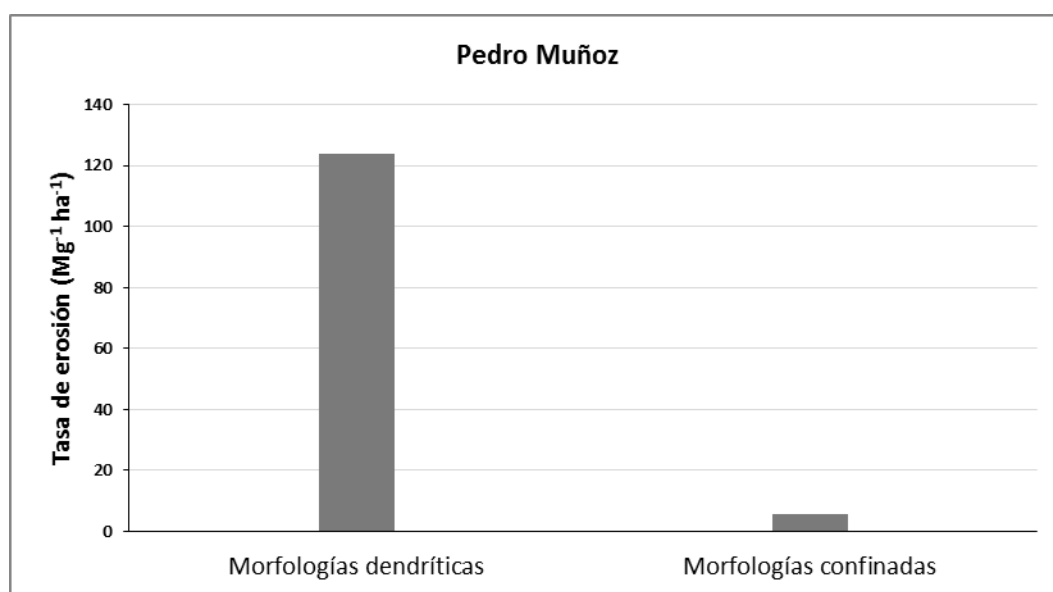


Figura 7.24: Tasa de erosión en las microcuencas estudiadas en Pedro Muñoz.

7.5.2.5. Síntesis de los resultados

A partir de los datos y la discusión sobre la influencia de la morfología en las tasas de erosión producidas, se puede afirmar que donde se desarrollan redes de regueros dendríticas las tasas de erosión medias son mayores que donde se desarrollan regueros confinados.

La diferencia de tasa de erosión media entre las dos morfologías en cada uno de los seis episodios erosivos estudiados es al menos del doble sobre las laderas donde se han desarrollado redes de regueros dendríticos, llegando a diferencias puntuales mucho mayores, hasta más de 25 veces de tasa de erosión asociada a la morfología dendrítica respecto de la confinada.

Se trata, además, de episodios erosivos desencadenados por precipitaciones de muy diferentes características: desde tormentas cuyo origen está en la formación de una célula convectiva, características de verano y principios de otoño, hasta temporales invernales. Esta variabilidad indica que el evento desencadenante del proceso erosivo no juega un papel relevante en la diferencia entre tasas de erosión asociadas a cada una de las morfologías descritas.

Por otro lado, en el análisis en cada uno de los episodios de las relaciones entre las densidades de drenaje y las tasas de erosión producidas no se ha observado un patrón común claro. En la figura 7.25 se representa, para la totalidad de los episodios erosivos estudiados, la relación existente entre las densidades de drenaje y las tasas de erosión producidas. Cabe recordar que

en esta figura no se han podido incluir los episodios erosivos de Cebolla y Pedro Muñoz por carecerse de esta información.

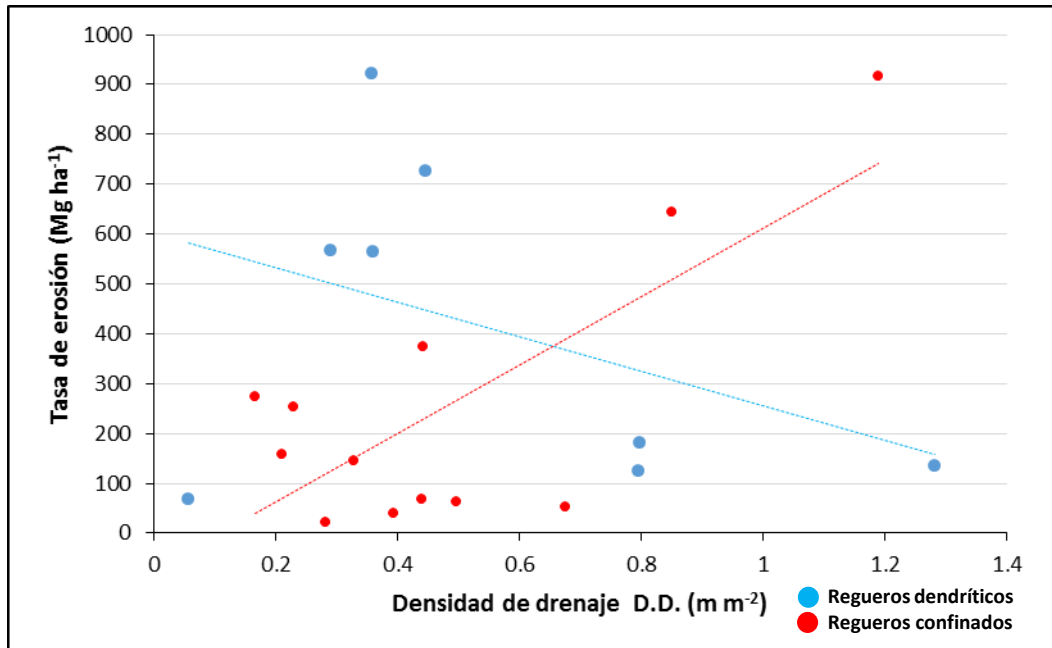


Figura 7.25: Distribución de la totalidad de las microcuencas en las que cuales se desarrollaron procesos erosivos de ladera en función de la densidad de regueros y las tasas de erosión asociadas a las mismas.

En el caso de los regueros confinados, en rojo, se observa una línea de tendencia con pendiente positiva, lo cual indicaría que un aumento en la densidad de drenaje produce una mayor tasa de erosión (figura 7.25). Pese a que la línea de tendencia presenta un ajuste bajo respecto a los valores presentados, la correlación entre los valores de la serie de estudio no es muy alta, $r = 0.743$, $R^2=0.552$. Sin embargo, se trata de un valor con significación estadística a nivel de $p<0.05$, lo que hace que pueda tomarse como representativo, indicando una tendencia clara, para cuya confirmación habrían de ser considerados un mayor número de casuísticas que las aquí estudiadas ($n=12$).

En el caso de los regueros dendríticos, línea de tendencia muestra una pendiente negativa, lo cual indicaría que una mayor densidad de drenaje se corresponde con una disminución en la tasa de erosión. Sin embargo, la correlación entre los valores de la serie es muy baja ($r=0.410$), sin significación estadística a nivel $p < 0.05$, no observándose, por tanto, ninguna relación entre la totalidad de los casos estudiados (figura 7.25).

No obstante, observando los casos de estudio, pueden diferenciarse dos estructuras de redes dendríticas: Por un lado, en los casos de Rielves, Villarrubia de los Ojos y Arroyomolinos 1 las redes presentan una importante tendencia a converger ladera debajo, de tal modo que las redes concluyen en un canal único o, a lo sumo, en dos o tres canales. Este hecho hace que se trate de redes con menor densidad de drenaje, menor número de canales totales, pero con secciones mayores, incluso muy importantes, en la parte más próxima al punto de desagüe de la cuenca. Estos ejemplos se podrían considerar como un modelo estricto de redes dendríticas; Por otro lado, los casos de Paracuellos del Jarama, Pj-1, Pj-2, Pj-3, presentan una morfología dendrítica algo particular. Se trata de un compendio de canales principales, más o menos paralelos y rectilíneos, que recorren la ladera desde su parte superior hasta su límite inferior, confluyendo en un gran canal de fondo de vaguada. Cada uno de estos canales principales presenta un buen número de convergencias, si bien se trata de canales tributarios de poca longitud en su mayoría (figura 7.26).

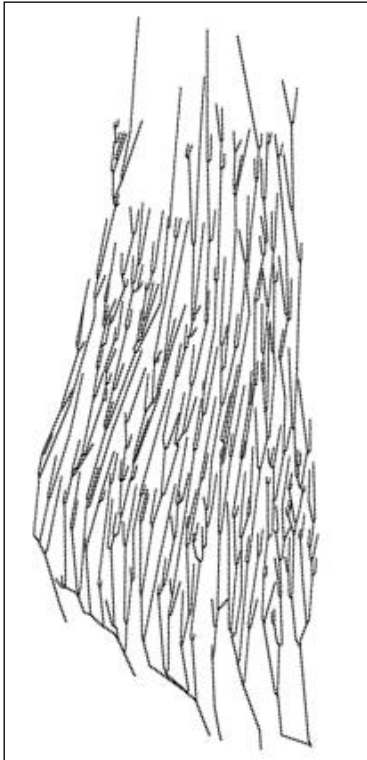


Figura 7.26: Red dendrítica Pj-3, que presenta regueros rectilíneos y paralelos aguas abajo y una menor confluencia de los regueros principales, no existiendo un punto único de drenaje de la microcuenca.

Este hecho produce que el incremento de sección aguas debajo de los regueros sea menor por producirse una menor concentración de caudal. La ausencia de concavidad o convexidad de las microcuencas caracterizadas en Paracuellos provocan este menor grado de confluencia. Al tratarse de superficies planas no existe un único punto de desagüe de la microcuenca ni una componente lateral en el desarrollo de los regueros hacia dicho único punto de desagüe. El resultado final es una densidad de drenaje muy elevada (tabla 7.13) aunque las secciones de los regueros no aumentan de forma notable (figura 7.12).

Esta diferenciación en el desarrollo de las redes, vinculada a la morfología de la cuenca de drenaje, convexa o planar, explica que, cuando se considera la totalidad de los casos, no exista una tendencia única, debido a que son dos estructuras de red diferentes con características diferenciadas.

En la figura 7.27 puede observarse el desarrollo de las secciones medias y máximas de las redes de regueros estudiadas. Los valores medios son algo superiores en las redes dendríticas, sin embargo, llama mucho la atención como en los casos de las redes dendríticas las secciones máximas de los regueros, normalmente las más próximas al punto de desagüe de la microcuenca, son mucho mayores en el caso de las redes dendríticas. Esto se debe a que las confluencias van aumentando las secciones aguas debajo de manera pronunciada. Cuando no se producen estas confluencias, redes de regueros confinados y redes dendríticas de Paracuellos del Jarama, el aumento de las secciones es más moderado aguas abajo. Entre los ejemplos de redes confinadas llama la atención el valor de sección máxima de Ri-2, que ha de recordarse presentaba una confluencia importante en la parte inferior de la microcuenca que hacía confluir la totalidad de los regueros a tan solo tres regueros finales con lo que este hecho significa en el aumento de las secciones de los canales (ver figura 5.46), no tratándose, por tanto, de una red confinada en sentido puro.

En la figura 7.27 también puede verse la particularidad de las redes dendríticas de Paracuellos, que presentando una elevadísima densidad de drenaje, sin embargo, su morfología particular (figura 7.26) hace que las secciones no aumenten en exceso aguas abajo, no presentando importantes secciones máximas.

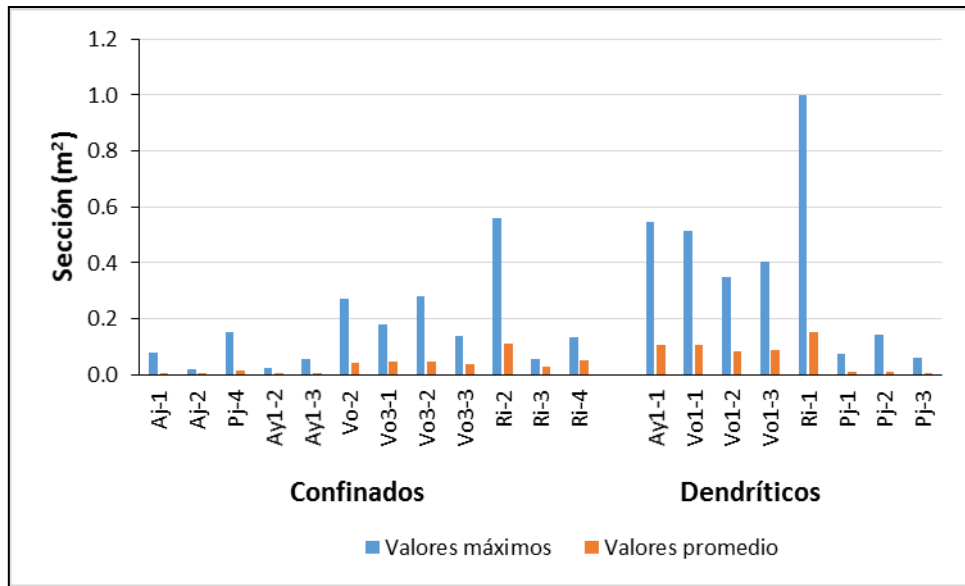


Figura 7.27: Secciones medias (naranja) y máximas (azul) de los regueros estudiados en las microcuencas. Se han diferenciado redes dendríticas de regueros y confinadas.

Considerando la explicación anterior, se ha reproducido la representación gráfica de la figura 7.25 excluyendo del análisis los casos de Paracuellos del Jarama (figura 7.28). En este caso, si se observa una tendencia similar en los casos dendríticos y confinados. Por tanto, en ambos casos, un incremento de la densidad de drenaje provoca una mayor tasa de erosión, si bien lo hace en mayor medida, mayor pendiente de la línea de tendencia, en el caso de los regueros dendríticos. Además, la línea de tendencia presenta un ajuste considerable respecto a los valores presentados, $R^2=0.775$. El coeficiente de correlación de Pearson para $n=5$ es de $r=0.88$, tratándose de un valor con significación estadística a nivel de $p<0.05$, lo que hace que pueda tomarse como representativo.

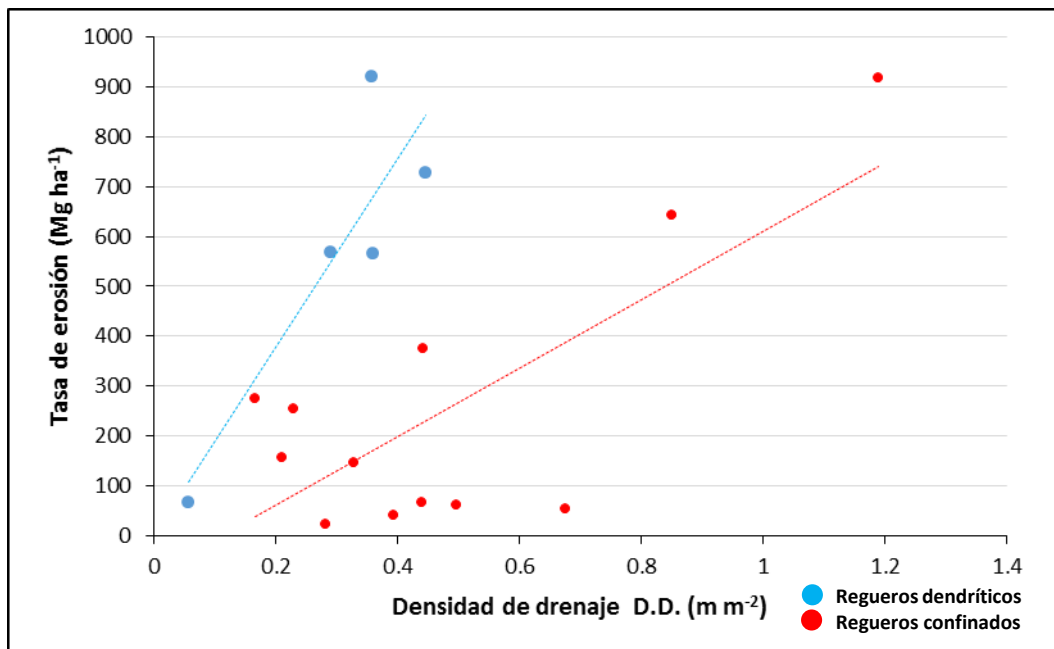


Figura 7.28: Distribución de las microcuencas en las que cuales se desarrollaron procesos erosivos de ladera en función de la densidad de regueros y las tasas de erosión asociadas a las mismas, excluyendo las de Paracuellos-Ajalvir con desarrollo de regueros dendríticos.

Por lo tanto, se puede concluir que, donde se desarrolla una red dendrítica de regueros la tasa de erosión es superior frente a las microcuencas donde se desarrollan redes de regueros confinadas. A su vez, existe una evolución en el incremento de la tasa de erosión dentro de las redes dendríticas de regueros: cuanto más compleja es la morfología de las redes dendríticas, es decir cuánto mayor es la densidad de drenaje, son esperables mayores tasas de erosión. La complejidad de las redes dendríticas de regueros está vinculada fundamentalmente a la superficie de la cuenca de drenaje, a través de la relación entre la misma y la descarga propuesta por Burkam en 1966 (ver eq. 2.1). En los casos de los regueros confinados, en los cuales cada uno de los surcos de labranza actúa a modo de cuenca de drenaje individual, limitando el caudal de descarga unitario y, en consecuencia, la sección del reguero, la superficie total del campo de cultivo no resulta un valor de interés, mientras si lo es en las laderas sobre las que se desarrollan redes dendríticas de regueros.

Además, a todo ello hay que añadir que en los casos estudiados, mientras en las laderas donde la dirección de laboreo fue próxima a las curvas de nivel se desarrollaron redes dendríticas de regueros y se produjeron mayores tasas de erosión, en las laderas donde el laboreo se realizó a favor de la máxima pendiente o bien se desarrollaron redes de regueros confinados o directamente no se produjo desarrollo de regueros.

La subdivisión de la escorrentía superficial entre el número de surcos existentes sobre la ladera produce un efecto limitante, de disminución del volumen total del agua que, en cada instante, fluye sobre los surcos. Un menor volumen de agua infiere una menor masa, que, tendrá una energía asociada menor y con ello una menor capacidad erosiva que si la ladera no estuviese roturada y la escorrentía superficial fluyese libremente en función de la microtopografía presente sobre la ladera.

En un proceso de formación de cabeceras clásico, hortoniano, que es el ligado a la formación de las redes de regueros confinados, para que incida una cabecera el flujo ha de superar el esfuerzo cortante crítico. El volumen total de agua aportado por la precipitación, la capacidad de infiltración de agua en el suelo, las características topográficas de la ladera (pendiente y longitud total de la misma), y la mayor o menor erodibilidad del suelo favorecerán o limitarán la erosión por flujos concentrados.

Los casos Ay1-4, Mo1-3, Zorreras-3, Valde-2 y Horm-3, son ejemplos estudiados en este trabajo de microcuencas sobre las cuales no se desarrollaron regueros, teniendo todas ellas como denominador común que la dirección de la labor fue a favor de la máxima pendiente y que sobre el mismo campo de cultivo existían otras microcuencas sobre las que sí se había desencadenado erosión por flujos concentrados, bien desarrollando morfologías dendríticas o confinadas.

En Ay1-4, comparativamente con Ay1-3, microcuenca que presentaba también una dirección de laboreo a favor de la máxima pendiente, viéndose ambas sometidas a la misma precipitación desencadenate de la erosión, el limitante en el desarrollo de los regueros pudo situarse en la combinación de una menor pendiente media junto a una mayor erodibilidad del suelo. Una pendiente del 5.63%, frente al 6.98% de Ay1-3 (tabla 5.5) confiere una menor energía al flujo de agua, disminuyendo su velocidad, lo que lo hace menos erosivo. Junto a ello, en Ay1-4 los contenidos de arcillas fueron algo superiores al resto de Ay-1 (ver tabla 5.2), dando lugar a un suelo más cohesivo, más difícilmente erosionable.

En el caso de Móstoles 1 se desarrollaron dos redes de regueros dendríticos sobre dos microcuencas sobre las cuales la dirección del laboreo seguida fue próxima a las curvas de nivel, si bien dichos procesos se han clasificado como procesos de vaguada, condicionados fundamentalmente por la topografía de las microcuencas. Junto a estas laderas se estudió la microcuenca Mo1-3, sin desarrollo de regueros y donde la dirección del laboreo fue a favor de

la máxima pendiente. No existiendo una comparativa directa con otra microcuenca con desarrollo de regueros confinados sobre las laderas adyacentes es difícil discernir cuales fueron las condiciones críticas para la formación de regueros que no se superaron en estas circunstancias ya que no hay diferencias significativas en las texturas del suelo ni las pendientes entre los tres casos de estudio de Móstoles 1. Quizás la concavidad presente en Mo1-1 y Mo1-2 fue suficiente para producir un acumulo de agua sobre una línea de drenaje preferente de la microcuenca, la vaguada, a la que contribuyo la dirección de los surcos de laboreo.

Casos similares son los de Zorreras-3, Valde-2 y Horm-3 (ver tabla 5.33). Estos tres casos no presentan diferencias significativas en textura, ni pendiente respecto a las microcuencas adyacentes sobre las que se desarrollaron redes de regueros dendríticos.

Por lo tanto, se puede concluir, que sobre una ladera que presente una dirección de laboreo a favor de la máxima pendiente, en circunstancias favorables (baja pendiente, menor longitud de la ladera, mayor cohesión del suelo, etc.) puede, no solo reducirse las tasas de erosión de forma considerable, sino generar las condiciones necesarias para que no se produzca la incisión de cabeceras en un proceso hortoniano clásico.

Con estas conclusiones, la evolución teórica de la relación entre la morfología de la red de regueros y las tasas de erosión esperables se presenta en la figura 7.29.

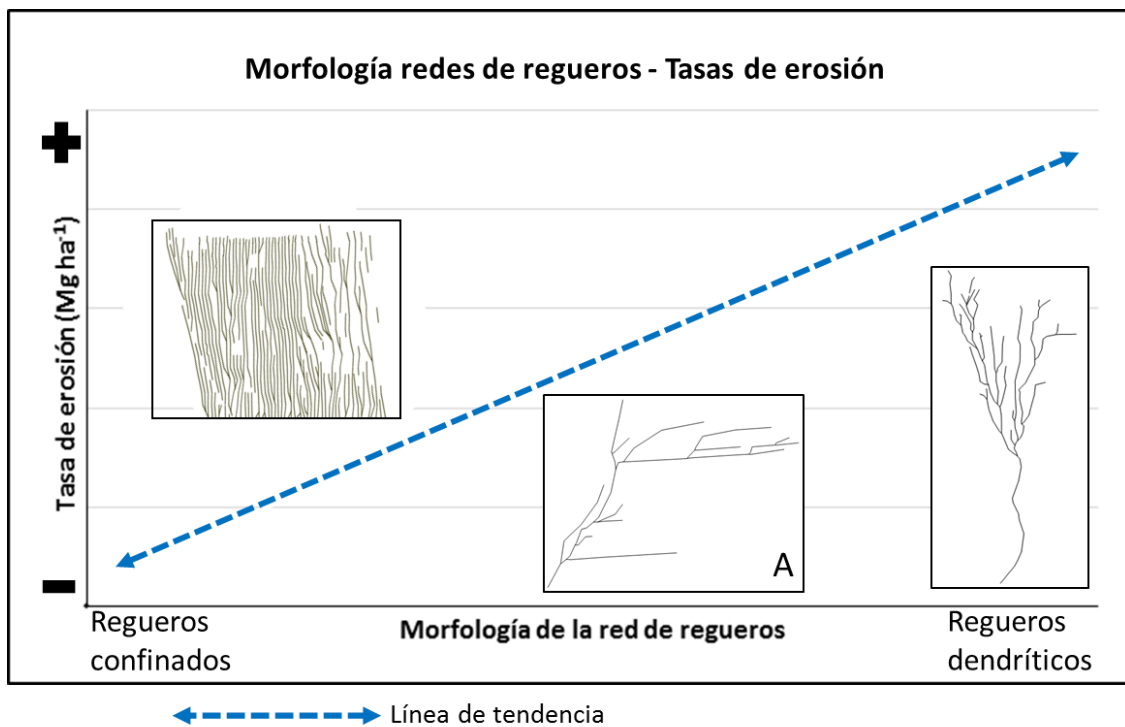


Figura 7.29: Modelo teórico de evolución entre la relación de la morfología de la red de regueros y las tasas de erosión esperables. A: morfologías mixtas.

7.5.3. Influencia de la rugosidad orientada sobre las tasas de erosión en los procesos erosivos de ladera

Una vez se ha relacionado la influencia de la rugosidad orientada sobre las morfologías de las redes de regueros desarrolladas y la influencia de estas últimas sobre las tasas de erosión producidas sobre las laderas donde se han desarrollado procesos erosivos de ladera, queda por relacionar la influencia de la rugosidad orientada sobre las tasas de erosión.

Hasta este momento, se ha concluido, *grosso modo*, que:

- En las microcuencas donde el ángulo entre la dirección de los surcos de labor y la máxima pendiente no superó los 25° se desarrollaron redes confinadas de regueros.
- En las microcuencas donde el ángulo superó los 40° las morfologías desarrolladas fueron dendríticas, que, a su vez, incrementan su complejidad según aumenta el valor del ángulo.
- Las redes dendríticas de regueros producen tasas de erosión al menos del doble de las que se producen donde se han desarrollado redes de regueros confinados, llegando a diferencias puntuales mucho mayores

De todo lo anterior puede extraerse que en los campos de cultivo, un mayor valor del ángulo entre la dirección de los surcos de labor y la máxima pendiente deberá producir una tasa de erosión más elevada, siempre y cuando se desencadene erosión por flujos concentrados.

En la tabla 7.19 se presentan los valores de rugosidad orientada, representados en el ángulo entre la dirección de los surcos de labor y la pendiente, y las tasas de erosión para los episodios donde se han desarrollado procesos erosivos de ladera con objeto de poder confirmar la relación anteriormente expresada. Obsérvese que en cada uno de los episodios erosivos representados existen microcuencas con desarrollo de regueros dendríticos y confinados, manteniendo, para ello, la selección de casos de estudio del apartado 7.5.2. que permitirá poder realizar una comparativa directa entre las dos morfologías de regueros estudiadas.

Tabla 7.19: Tasas de erosión y ángulos entre la dirección de los surcos de labor y la máxima pendiente en las microcuencas donde se han desarrollado procesos erosivos de ladera.

Regueros dendríticos			Regueros confinados		
Microcuenca	Tasa de erosión (Mg ha ⁻¹)	Angulo dirección surcos-pendiente	Microcuenca	Tasa de erosión (Mg ha ⁻¹)	Angulo dirección surcos-pendiente
Ay1-1	54.59	21.05	Ay1-2	27.34	63.81
Vo1-1	465.33	40.2	Ay1-3	17.15	64.20
Vo1-2	595.54	40.2	Vo-2	526.77	7.99
Vo1-3	463.38	40.2	Vo3-1	207.69	6.7
Pj-1	101.69	66.83	Vo3-2	749.95	6.7
Pj-2	148.38	74.63	Vo3-3	128.52	6.7
Pj-3	110.27	71.08	Pj-4	54.38	17.84
Ri-1	754.8	84	Aj-1	50.27	67.50
Ce-1	68.18	45	Aj-2	41.86	76.89
P-Muñoz1-1	101.02	40	Ri-2	224.20	11
			Ri-3	119.00	6
			Ri-4	306.60	23
			Ce-2	2.53	0
			P-Muñoz1-2	4.52	0

A partir de los valores de la tabla 7.19, se ha representado la distribución de las microcuencas de estudio en el plano definido por la rugosidad orientada (ángulo entre la dirección de los surcos de la labor y la máxima pendiente) y las tasas de erosión (figura 7.30). Se representan en la gráfica los valores correspondientes de las siete microcuencas estudiadas en el episodio erosivo de Villarrubia de los Ojos, en amarillo, de las seis microcuencas estudiadas en el episodio erosivo de Paracuellos-Ajalvir, en azul, de las tres microcuencas estudiadas en el episodio erosivo de Arroyomolinos 1, en gris, de las cuatro microcuencas del episodio erosivo de Rielves, en naranja y de las dos microcuencas estudiadas en los episodios tanto de Cebolla, en rojo, como de Pedro Muñoz, en verde.

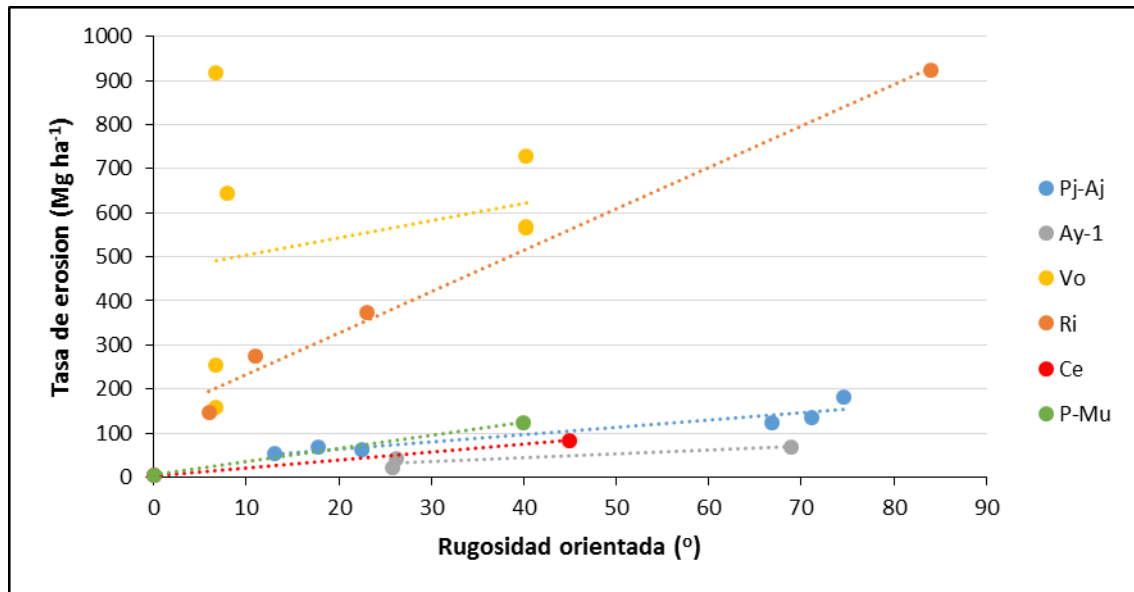


Figura 7.30: Relación entre el ángulo formado por la longitud de aparición de las cabeceras desde la divisoria de aguas de la microcuenca y el ángulo del laboreo en cada una de las cabeceras.

Con excepción del episodio de Villarrubia de los Ojos, los valores de correlación (r de Pearson) obtenidos son verdaderamente elevados (tabla 7.20), si bien tan solo las correlaciones de los casos de Paracuellos-Ajalvir y Rielves presentan significación estadística a nivel $p < 0.05$, por lo que pueden considerarse representativos. Los casos de Cebolla y Pedro Muñoz tan solo presentan dos valores a comparar (dos microcuencas) por lo que no puede evaluarse la correlación existente.

Es común a los seis episodios erosivos que presentan líneas de tendencia con pendiente positiva, de mayor o menor grado. Presenta en este caso una pendiente mucho más elevada en su línea de tendencia el episodio de Rielves, ya que la microcuenca con desarrollo de regueros dendríticos presenta unos valores muy elevados de rugosidad orientada, prácticamente laboreo a nivel, lo que repercute en un valor de tasa de erosión muy elevado. Las otras tres microcuencas presentan valores de rugosidad orientada bajos, lo que generó redes de regueros confinadas y con ello una menor tasa de erosión. La relación se repite en los otros cinco casos de estudio, con grados de pendiente más moderadas (tabla 7.20).

Tabla 7.20: Valores de pendiente de la línea de tendencia y de correlación (r de Pearson) con el número de casos (n) correspondiente a cada uno de los episodios erosivos representados en la figura 7.24. Los coeficientes subrayados presentan significación estadística a nivel $p < 0.05$.

Episodio erosivo	Pendiente de la línea de tendencia	Correlación (r)	n
		Rugosidad orientada-Tasa de erosión	
Arroyomolinos 1 (Ay-1)	0.75	0.92	3
Villarrubia de los Ojos (VO)	3.24	0.27	7
Paracuellos-Ajalvir (Pj-Aj)	1.37	<u>0.95</u>	6
Rielves (Ri)	7.72	<u>0.99</u>	4
Cebolla (Ce)	1.46	ϕ	2
Pedro Muñoz (P-Mu)	2.41	ϕ	2

La distorsión que se produce en el caso de Villarrubia de los Ojos se debe a que en dos de las microcuencas con desarrollo de regueros confinados, es decir, con bajo grado de rugosidad orientada, por debajo de los 10° , se produjeron altas tasas de erosión lo cual reporta el escaso valor de correlación, así como el escaso ajuste de la línea de tendencia a los valores representados. Aun así, mantiene la pendiente positiva, o lo que es lo mismo, sigue reflejando

que un mayor ángulo entre la dirección de laboreo y la máxima pendiente produce mayores tasas de erosión.

Por lo tanto, se puede afirmar que existe una tendencia, mayor o menor según las circunstancias particulares de cada episodio erosivo, a que las tasas de erosión sean mayores sobre las laderas donde la dirección del laboreo (rugosidad orientada) más se acerca a la perpendicular respecto a la máxima pendiente.

Como conclusión, se presenta en la figura 7.31 la evolución teórica de la relación entre la rugosidad orientada, la morfología de la red de regueros desarrollada y las tasas de erosión esperables. En la misma puede observarse que cuanto más compleja es la morfología de las redes dendríticas, es esperable que se produzcan mayores tasas de erosión.

Se trata de un modelo teórico equivalente al de la figura 7.29 pero considerando en el mismo la orientación de la rugosidad existente. La evolución siempre presentará una pendiente positiva en base a los datos que se presentan en este estudio.

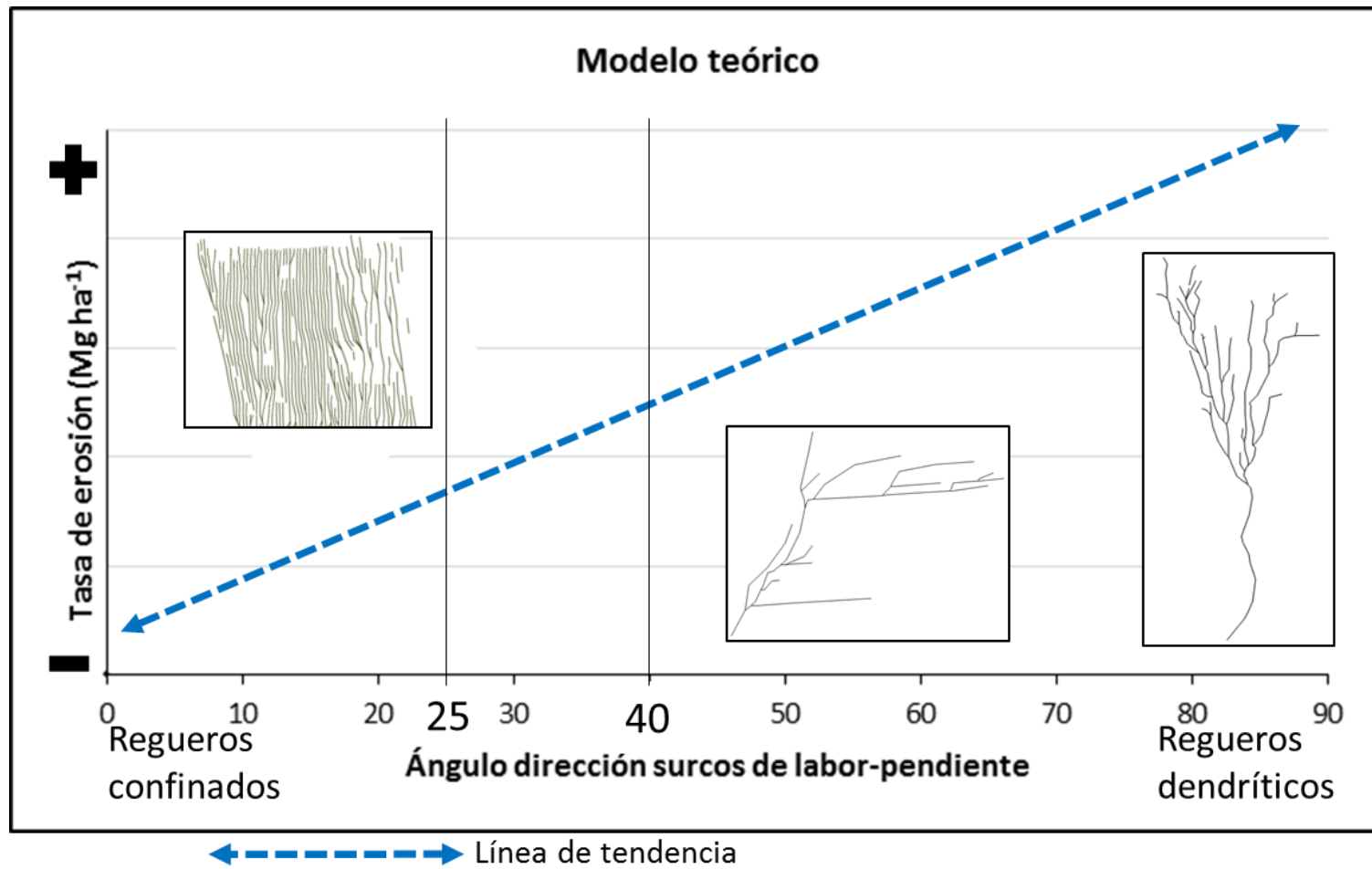


Figura 7.31: Modelo teórico de evolución entre la relación de la rugosidad orientada, expresada en el valor del ángulo formado entre la dirección de los surcos de labor y la máxima pendiente y las tasas de erosión esperables. En el gráfico se observan 2 líneas verticales que marcan los vales de 25 y 40°, que indican el intervalo en el que no se dispone de datos de campo.

7.6. Conclusiones

En el conjunto de los resultados obtenidos para los procesos erosivos de vaguada se puede concluir que no se observa ningún control significativo de las dimensiones de las cárcavas efímeras por parte de la pendiente de la ladera. Sin embargo, sí parece que existe una relación entre la superficie de drenaje y las secciones de la cárcava desarrollada en cada uno de los casos, si bien esta relación es débil para el conjunto de casos estudiados.

Por otro lado, en el conjunto de los resultados obtenidos para los procesos erosivos de ladera se puede concluir que existe una cierta correlación entre las superficies de drenaje y las secciones totales, siendo algo mayor dicha correlación allí donde se desarrollaron regueros confinados que donde lo hicieron regueros dendríticos. Sin embargo, la pendiente no presenta una correlación relevante en los procesos erosivos de ladera, excepto sobre las laderas donde es muy pronunciada. En ese caso, la pendiente es más influyente en el caso de los regueros confinados.

Estas diferencias en el control que ejercen la superficie de drenaje y la pendiente sobre las secciones de los canales entre las redes de regueros dendríticas y las redes confinadas se deben a que ambos procesos tienen orígenes diferentes. Mientras los procesos de formación de regueros confinados responden a procesos hortonianos clásicos de incisión de cabeceras, al igual que sucede en los procesos erosivos de vaguada, sin embargo, los procesos de formación de regueros dendríticos se desencadenan a partir del desbordamiento de los caballones, cuando la lámina de agua acumulada supera la capacidad de almacenamiento que ofrecen los caballones.

Esta diferencia en los procesos de formación de cada una de las morfologías están condicionados por las marcas existentes en el terreno, la rugosidad orientada generada por los surcos de labor, que tiene una gran influencia en el comportamiento hidrológico, erosivo y sedimentario de las laderas agrícolas, especialmente aquellas con morfologías planas y menos influenciadas por los factores topográficos. Las redes de regueros confinados se han desarrollado sobre las laderas donde el ángulo entre la dirección de los surcos de labor y la máxima pendiente fue igual o inferior a los 40° , mientras las redes dendríticas de regueros se han desarrollado allí donde el ángulo entre la dirección de los surcos de labor y la máxima pendiente fue de al menos 26° .

Esta diferencias morfológicas en los patrones erosivos tienen su reflejo en las tasas de erosión producidas: sobre las laderas donde se han desarrollado redes dendríticas de regueros las tasas de erosión medias son mayores que donde se han desarrollado redes de regueros confinados. La diferencia de tasa de erosión media entre las dos morfologías ha sido al menos del doble, llegando a diferencias puntuales de hasta 25 veces más.

A todo ello se suma el incremento de la tasa de erosión dentro de las propias redes dendríticas de regueros: cuanto más compleja es la morfología de las redes dendríticas, es decir cuánto mayor es la densidad de drenaje, lo cual se produce a mayores ángulos entre la dirección de los surcos de labor y la máxima pendiente, son esperables mayores tasas de erosión.

En contraposición, sobre una ladera que presente una dirección de laboreo a favor de la máxima pendiente, en circunstancias favorables (baja pendiente, menor longitud de la ladera, mayor cohesión del suelo, etc.) puede, no solo reducirse las tasas de erosión de forma considerable, sino generar las condiciones necesarias para que no se produzca la incisión de cabeceras en un proceso hortoniano clásico.

Con estas conclusiones, la evolución teórica de la relación entre la rugosidad orientada, la morfología de la red de regueros desarrollada y las tasas de erosión esperables se presenta en la figura 7.31.

Por último, los episodios erosivos estudiados se han desencadenado a partir de precipitaciones de muy diferentes características: desde tormentas de alta intensidad, características del verano, hasta temporales invernales. Esta variabilidad indica que el evento desencadenante del proceso erosivo no juega un papel relevante en la diferencia entre tasas de erosión asociadas a cada una de las morfologías descritas.

8. ANÁLISIS DEL LABOREO EN CONTORNO COMO ESTRATEGIA PARA LA CONSERVACIÓN DEL SUELO

8.1. Introducción

La primera referencia escrita del concepto del laboreo en contorno como beneficioso para el control de la erosión de los suelos agrícolas data de 1813 y su autor fue Thomas Jefferson, tercer presidente de los EE.UU. y reconocido horticultor (Laflen y Flanagan, 2013).

El laboreo en contorno o laboreo a nivel, es decir, el realizado según una dirección próxima a la de las curvas de nivel, o lo que es lo mismo, perpendicular a la dirección de la máxima pendiente, está considerado en la actualidad como una de las más elementales prácticas de conservación y resulta de obligada aplicación en España según las diferentes transposiciones a la legislación nacional de las directivas europeas emanadas desde la PAC (Política Agraria Común) (ver apartado 2.7.).

Son los modelos de determinación de la erosión USLE (Wischmeier y Smith, 1978) y RUSLE (Renard et al., 1997) los que afianzan el concepto de laboreo en contorno como una de las buenas prácticas agrícolas que contribuyen a la conservación del suelo. Con posterioridad a la publicación del modelo USLE, se han publicado multitud de investigaciones que inciden en esta línea (ver, por ejemplo, Lal, 1990; Flanagan y Livingston, 1995; Hatfield et al., 1998; Stevens et al., 2009; proyecto SOCO -Sustainable Agriculture and Soil Conservation-, 2009; Liu et al. 2014a, Liu et al., 2014b). Como principales ventajas de la técnica, se destaca la mejora de la capacidad de infiltración del suelo, ya que se retiene el agua en el horizonte superficial del suelo, la disminución de la velocidad de la escorrentía y el control de las pérdidas de agua y la erosión por laboreo (Lal, 1990; Hatfield et al., 1998; proyecto SOCO -Sustainable Agriculture and Soil Conservation-, 2009; Stevens et al., 2009). Sin embargo, la capacidad para la conservación del suelo puede disminuir en pendientes pronunciadas o bajo precipitaciones de alta intensidad, pese a lo cual muchos autores recomiendan mantener el laboreo en contorno, combinando las labores a nivel con otras medidas de conservación como el diseño de terrazas o el cultivo en fajas (Flanagan y Livingston, 1995; Hatfield et al., 1998; USDA-ARS, 2008b; proyecto SOCO -Sustainable Agriculture and Soil Conservation-, 2009).

Desde hace varias décadas, la investigación aplicada sobre la erosión se ha centrado en el desarrollo de modelos de simulación numérica. Estos modelos permiten evaluar espacialmente la ocurrencia de fenómenos de erosión, analizar su evolución temporal y simular los efectos de cambios en las variables climáticas y paisajísticas, como por ejemplo en el uso del suelo (Alatorre y Beguería, 2009). Los problemas que, en ocasiones, plantean las mediciones directas, por ejemplo, la limitada área de aplicación de algunas técnicas, junto a un elevado coste de recursos económicos (equipamientos) y de recursos temporales, cuando no humanos, ha convertido la utilización de modelos de predicción en la investigación de los procesos de erosión y redistribución del suelo en herramientas de uso frecuente (López Vicente, 2007).

Sin embargo, los modelos de erosión presentan diversas limitaciones debido, entre otras razones, a la gran heterogeneidad de las propuestas existentes, la incertidumbre de los resultados, la escasa información de campo disponible para su validación y calibración, etc. que pueden derivar en la obtención de resultados e interpretaciones erróneas. Pese a ello, la simplicidad en su aplicación ha llevado a un uso generalizado e indiscriminado de estos métodos, con independencia, en muchos casos, de las condiciones para las que se generaron. En esta línea, en los últimos años, se observa un incremento en el número de publicaciones científicas SCI (*Science Citation Index*) que utilizan modelos de predicción para abordar la investigación de la erosión (López Vicente, 2007).

Dependiendo de la forma matemática que adopta la descripción de los procesos físicos que se simulan, los modelos de erosión pueden ser clasificados en tres categorías: empíricos, conceptuales y de base física (Merritt et al., 2003 en Alatorre y Beguería, 2009).

Los modelos USLE (*Universal Soil Loss Equation*, en castellano, Ecuación Universal de Pérdida de Suelo) y RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*, en castellano, Ecuación Universal de Pérdida de Suelo Revisada) son dos modelos empíricos concebidos para predecir la pérdida de suelo a largo plazo, periodos anuales, producida por la escorrentía superficial sobre laderas cultivadas con sistemas de manejo específicos. El modelo USLE se trata, probablemente, de uno de los desarrollos más significativos del siglo XX en el campo del conocimiento y control de la erosión de los suelos (Lafren y Moldenhauer, 2003) que, sin embargo, presenta una serie de limitaciones, que trataron de superarse con el desarrollo de la RUSLE. Manteniendo la estructura básica de la USLE, en la que está basada, la RUSLE presenta algunos cambios en los algoritmos de cálculo que explican individualmente cada uno de los factores. Si bien, uno de los cambios más significativos es la informatización del modelo que facilita su aplicación, de manera que cada factor queda determinado recurriendo a las bases de datos integradas en el programa informático en el que se apoya, o introduciendo nuevos valores para condiciones específicas.

Ambos modelos, USLE y RUSLE, calculan la pérdida de suelo media anual mediante los mismos seis factores (eq. 8.1), si bien los métodos para determinar los valores de cada uno de los factores difieren considerablemente, siendo mucho más complejos en el caso de la RUSLE. La computerización del modelo permitió este grado de complejidad en los cálculos.

$$A = R * K * L * S * C * P \quad (\text{eq. 8.1})$$

Siendo: A ($\text{Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$), la pérdida de suelo promedio anual; R ($\text{MJ mm ha}^{-1} \text{ h}^{-1} \text{ año}^{-1}$), el factor de erosividad de la lluvia y de la escorrentía; K ($\text{Mg ha h ha}^{-1} \text{ MJ}^{-1} \text{ mm}^{-1}$), el factor de erodibilidad del suelo; L (adimensional), el factor topográfico de longitud de la ladera; S (adimensional), el factor topográfico de la pendiente de la ladera; C (adimensional), el factor de la gestión del suelo y de las cubiertas del suelo y de la vegetación; y P (adimensional), el factor de las medidas de conservación del suelo.

Es el factor P , factor de prácticas de conservación (eq. 7.1), el que considera el laboreo en contorno como estrategia, entre otras, para la conservación del suelo tanto en el modelo USLE, como en su posterior revisión, la RUSLE.

8.2. El desarrollo de la USLE y, posteriormente, de la RUSLE

La USLE fue desarrollada a lo largo de varias décadas con datos adquiridos a partir de parcelas experimentales de erosión bajo condiciones específicas de precipitación, suelo y pendientes en Estados Unidos.

Pese a que las primeras referencias sobre la utilización de parcelas de erosión se remontan a finales del s. XIX en Europa (Dotterweich, 2013) y a 1915 en los EE.UU. (Miller, 1946 en Lafren y Flanagan, 2013) (foto 8.1), fue a partir de 1930 cuando se produjo un verdadero impulso a esta metodología.

El origen de la campaña de investigación que utilizó de forma intensiva las parcelas de erosión como herramienta para la adquisición de datos de campo y que cristalizaría, años después, con la publicación de la USLE, entre otras muchas aportaciones, se inició a partir de la publicación en 1928 de la circular de la USDA (*United States Department of Agriculture*): “Erosión del suelo: una amenaza nacional” (Bennet y Chapline, 1928). Hugh H. Bennett, consiguió hacer llegar a la opinión pública y al *establishment* político del momento la amenaza existente sobre los suelos, logrando que, en 1929, el Congreso de los Estados Unidos destinase una importante cantidad de dinero para impulsar un ambicioso programa de investigación sobre la materia. En La Crosse (Wisconsin), Guthrie (Oklahoma), Temple y Tyler (Texas), Hays (Kansas), Bethany (Missouri), Statesville (Carolina del Norte), Pullman (Washington), Clarinda (Iowa) y Zanesville (Ohio) se instalaron parcelas de erosión. Fueron instaladas estas diez estaciones experimentales

representativas de diez grandes regiones de los EE.UU (Gilley y Flanagan, 2007). Con la excepción del campo experimental de Pullman (Washington), situado en la costa Oeste norteamericana, las otras nueve instalaciones se situaron en el conocido como “Cinturón del maíz” (*Corn Belt*) de EE.UU que, situado al Este de las Montañas Rocosas, representa la región más intensamente agrícola del Medio-Oeste estadounidense, con suelos intensamente explotados.

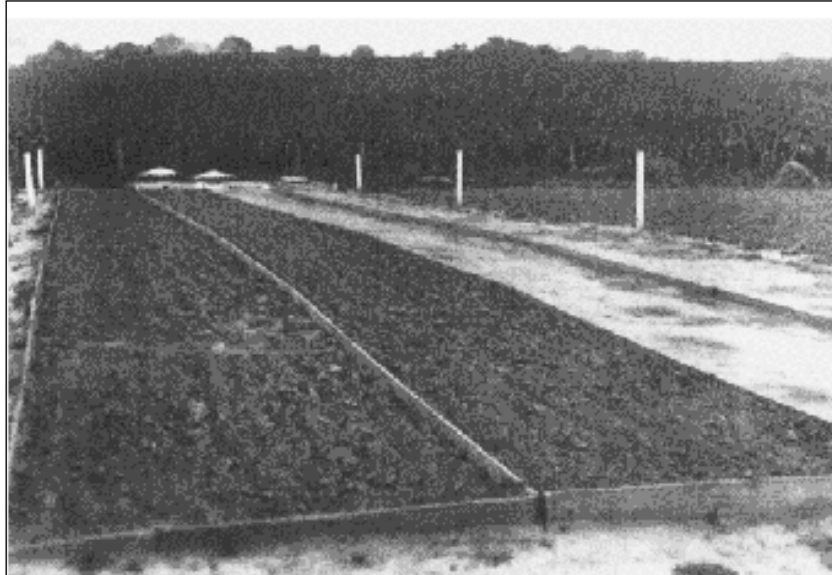


Foto 8.1: Parcelas instaladas por Vifquain en 1916, siguiendo el modelo de las instaladas por McClure en 1915. Las parcelas tenían 91 pies (27.73 m) de largo y 5.5 pies (1.67 m) de ancho, sobre una pendiente del 4%.

Posteriormente, y con el objetivo de ampliar las informaciones obtenidas más allá de las condiciones propias del *Corn Belt*, la red experimental fue ampliada hasta un total de 49 localizaciones*. En algún momento, el centro responsable de la recepción y el tratamiento de aquella ingente cantidad de información llegó a recibir datos de escorrentía y erosión de suelos de más de 1000 parcelas experimentales en un año, que hasta 1960 midieron la erosión y escorrentía producida por lluvia natural. A partir de 1960 fue incluida la simulación de lluvia sobre las parcelas experimentales como metodología de trabajo, con la utilización de hasta 23 simuladores de lluvia, con objeto de completar ciertas carencias de información a la hora de un mejor desarrollo de los diferentes factores de la ecuación.

*: Batesville (Arkansas), Tifton y Watkinsville (Georgia), Dixon Springs, Joliet y Urbana (Illinois), Lafayette (Indiana), Castana, Beaconsfield, Independence y Seymour (Iowa), Baton Rouge (Louisiana), Presque Isle (Maine), Benton Harbour y East Lansing (Michigan), Morris (Minnesota), Holly Springs y State College (Mississippi), McCredie (Missouri), Hastings (Nebraska), Beemerville, Marlboro y New Brunswick (New Jersey), Ithaca, Geneva y Marcellus (New York), Raleigh (Carolina del Norte), Coshocton (Ohio), Cherokee (Oklahoma), State College (Pensilvania), Clemson y Spartanburg (Carolina del Sur), Madison (Dakota del Sur), Knoxville y Greeneville (Tennessee), Blacksburg (Virginia), Madison y Owen (Wisconsin) y Mayagüez (Puerto Rico), se unieron a las diez localizaciones primigenias con parcelas de erosión.

El diseño de las parcelas experimentales se basó en estudios del grupo de investigación liderado por Duley y Miller en la Universidad de Missouri (Meyer y Moldenhauer, 1985). El diseño más común consistió en una parcela de 6 pies (1.83 m) de anchura y 72.6 pies (22.13 m) de longitud, lo que suponía el 1% de 1 acre (40.46 m²) de superficie. La pendiente de la parcela dependería de la que existiese en el lugar en que fuera implantada. Aun así, en muchos lugares terminaron por implantarse parcelas de dimensiones muy dispares, desde mucho mayores a mucho menores respecto a la superficie original diseñada (Laflen y Moldenhauer, 2003).

Las parcelas instaladas fueron, en todos los casos, parcelas cerradas, aquellas delimitadas exteriormente por una barrera artificial, que puede construirse de diferentes materiales, cumpliendo dos objetivos fundamentales: delimitar con exactitud una superficie concreta e impedir la entrada o salida de escorrentía y sedimentos de la parcela, de manera que ésta queda aislada del resto de la ladera. La instalación de límites de parcela artificiales facilita la realización de diseños experimentales con replicación de parcelas, así como la comparación entre resultados, ya que éstas pueden ser copias exactas en cuanto tamaño y forma.

Sin embargo, el cierre de las parcelas supone una serie de implicaciones a tener en cuenta, como la inevitable alteración de la superficie del suelo durante la construcción del límite y el conjunto de interferencias en el comportamiento hidrológico de la parcela al que da lugar la mera presencia física de los límites artificiales, denominado “efecto borde” (foto 8.2).



Foto 8.2: Hugh H. Bennett, primer director del Servicio de Conservación del Suelo (SCS) de los EE.UU., inspeccionando las parcelas de erosión instaladas en la estación experimental de Red Plains (Guthrie, Oklahoma) a principios de la década de 1930. En la fotografía puede observarse que las parcelas instaladas fueron parcelas cerradas.

Existe una gama extensísima de tamaños de parcela utilizados experimentalmente que pueden agruparse, de forma general, en tres conjuntos: microparcels (superficie inferior a 10 m²), adecuadas para la investigación detallada de aspectos básicos de los procesos erosivos, parcelas de tamaño medio (superficie menor de 200 m²) y parcelas de gran tamaño (superficie mayor de 200 m²).

El grupo más extendido es el de las parcelas de tamaño medio, al que pertenecen la inmensa mayoría de las parcelas que sirvieron para desarrollar y calibrar tanto la USLE como, posteriormente, la RUSLE.

A modo de ejemplo representativo del resto de localizaciones, en la tabla 8.1 se presentan las características de las parcelas experimentales ubicadas en Clarinda (Iowa), 22 años de registro, Marcellus (New York), 11 años de serie temporal registrada, y Beemerville (New Jersey), 3 años de registro.

Tabla 8.1: Resumen de las características de las parcelas localizadas en Clarinda (Iowa), Marcellus (New York) y Beemerville (New Jersey).

Número de serie	Número de parcela	Serie temporal	Dimensiones de la parcela				Localización
			Longitud (m)	Anchura (m)	Superficie (m ²)	Pendiente (%)	
1	1	1932 a 1942	10.97	1.83	20.08	9	Clarinda (Iowa)
1	2	1932 a 1942	44.20	1.83	80.89	9	Clarinda (Iowa)
1	3 a 9	1932 a 1942	22.25	1.83	40.72	9	Clarinda (Iowa)
1	1 a 9	1943 a 1953	22.25	1.83	40.72	9	Clarinda (Iowa)
2	1 a 10	1933 a 1939	22.25	3.35	74.54	9	Clarinda (Iowa)
3	1	1933 a 1939	192.02	12.80	2457.86	8	Clarinda (Iowa)
3	2	1933 a 1939	96.01	12.80	1228.93	8	Clarinda (Iowa)
3	3	1933 a 1939	48.16	12.80	616.45	8	Clarinda (Iowa)
3	4	1933 a 1939	48.16	25.60	1232.90	8	Clarinda (Iowa)
4	9 a 24	1944 a 1947	22.25	3.35	74.54	φ	Clarinda (Iowa)
5	1 a 12	1943 a 1949	22.25	3.35	74.54	8.9-10.5	Clarinda (Iowa)
1	1 a 4	1939 a 1949	22.25	6.40	142.42	18.0-19.0	Marcellus (NY)
2	1, 5 y 9	1939 a 1946	10.97	6.40	70.23	16.0-16.4	Marcellus (NY)
2	2 y 4	1939 a 1946	21.95	6.40	140.47	16.6-16.8	Marcellus (NY)
2	3, 6 y 7	1939 a 1946	64.01	6.40	409.70	17.2-17.6	Marcellus (NY)
2	8	1939 a 1946	22.25	6.40	142.42	16.8	Marcellus (NY)
3	1, 6 y 7	1940 a 1946	64.01	6.40	409.70	4.5-5.0	Marcellus (NY)
3	2, 5 y 8	1940 a 1946	21.95	6.40	140.47	3.9-5.0	Marcellus (NY)
3	3, 4 y 9	1940 a 1946	10.97	6.40	70.23	3.7-5.3	Marcellus (NY)
4	1,4 y 9	1940 a 1946	10.97	6.40	70.23	8.5-9.4	Marcellus (NY)
4	2,5 y 8	1940 a 1946	21.95	6.40	140.47	9.4-9.7	Marcellus (NY)
4	3, 6 y 7	1940 a 1946	64.01	6.40	409.70	9.4-9.6	Marcellus (NY)
1	1 a 6	1938 a 1940	21.34	4.27	91.12	16.5	Beemerville (NJ)

En el campo experimental de Clarinda (Iowa), estuvieron instaladas entre los años 1932 y 1953 un número variable de parcelas para el estudio de la erosión y la escorrentía, nunca inferior a 9 y que llegaron a ser 36 durante algunos años de la serie. Las parcelas, con pendientes entre el 8 y el 10%, presentaron dimensiones muy diversas, teniendo, la mayor de ellas casi 2500 m² de superficie (192.02 x 12.80 m), mientras la menor apenas tenía 20 m² de superficie (10.97 x 1.83 m). Sin embargo, la longitud más común entre las parcelas instaladas en Clarinda fue de 22.25 m, mientras las anchuras más representativas pueden considerarse las de 1.83 y 3.35 m. Respecto a las superficies de las parcelas de estudio una inmensa mayoría presentaba superficies iguales o inferiores a los 80 m². Tan solo las parcelas de la serie 3 tuvieron superficies superiores (tabla 8.1).

En Marcellus (New York) fueron instaladas hasta 31 parcelas de erosión de cuatro dimensiones diferentes: 142.42, 70.23, 140.47 y 409.70 m². Se trató de un diseño de parcelas de erosión con diferentes longitudes, hasta 64 m de longitud máxima, diferentes grados de pendiente, entre el 3.7 y el 19%, pero siempre con la misma anchura: 6.4 m (tabla 8.1).

Por último, en Beemerville (New Jersey) se instalaron seis parcelas de erosión que recogieron los valores de erosión y escorrentía producidos durante tres años. En este caso, se instaló un diseño único de parcela de erosión: 21.34 x 4.27 m, delimitando una superficie de estudio de algo más de 91 m² con una pendiente del 16.5% en todas ellas (tabla 8.1).

La mayoría de las parcelas de erosión, en las tres localizaciones tomadas como ejemplo, presentaban dimensiones inferiores a los 200 m², siendo especialmente destacable que los diseños no superaron los 6.4 m de anchura. La excepción a lo citado se situó en las cuatro parcelas de la serie 3 instaladas en Clarinda (Iowa).

Las publicaciones de referencia que describen el desarrollo de los modelos USLE/RUSLE y posteriores no hacen tanto hincapié en las dimensiones concretas de las parcelas

experimentales que se implantaron y la importancia de dichas dimensiones, como en la impresionante red de estaciones experimentales existentes que aportaban una cantidad ingente de datos para la investigación (ver, por ejemplo, Meyer, 1984; Meyer y Moldenhauer, 1985; Laflen y Moldenhauer, 2003; Flanagan et al., 2007; Laflen y Flanagan, 2013) (foto 8.3).



Foto 8.3: Arriba: Técnicos trabajando en las parcelas de erosión instaladas en McCredie (Missouri) en la década de 1950 donde se instalaron 41 parcelas de erosión que estudiaron diferentes sistemas de cultivos desde el punto de vista de la conservación del suelo. Abajo: Campo experimental con hasta 40 parcelas de erosión instalado en Columbia (Missouri). En este caso, las parcelas presentaban 22.1 m de largo y 3.65 m de ancho.

8.2.1. El concepto de parcela de referencia

Pese a la las diferentes superficies de estudio que presentaban las parcelas experimentales instaladas, el concepto de parcela de referencia fue muy utilizado con objeto de establecer los diferentes valores de los factores de la USLE. La parcela de referencia fue definida como una parcela experimental de 72.6 pies (22.13 m) de longitud y 6 pies (1.8 m) de anchura con un 9% de pendiente que se mantenía mediante una continua labranza a favor de la máxima pendiente, en condiciones de barbecho. Esta parcela se utilizaba como referencia de las condiciones de

manejo y prácticas de conservación a evitar, de tal manera que cualquier otro manejo o práctica de conservación aplicada podía ser comparada con esta y observar si resultaba beneficiosa o no para la conservación del suelo. De esta manera, los impactos de cualquier práctica de conservación podía ser expresada en términos porcentuales respecto al laboreo aplicado en las parcelas de referencia.

Curiosamente, pese al interesante concepto de comparación directa que proponía la existencia de la parcela de referencia, no pasó de ser un mito, un concepto teórico, porque nunca fueron citados datos procedentes de una parcela de referencia (Laflen y Moldenhauer, 2003).

8.2.2. El origen de la RUSLE

Pese al avance que supuso la publicación del modelo USLE, existían deficiencias bien conocidas que limitaban su aplicabilidad en muchas circunstancias. Debido a dichas limitaciones del modelo, el importante impacto que estaba suponiendo en aquel tiempo el desarrollo de las herramientas informáticas y el éxito que había supuesto el desarrollo del modelo predictivo de base física CREAMS (Knisel, 1980), en 1985 se organizó en la Universidad de Purdue (West Lafayette, Indiana) un grupo de trabajo en el que se tomaron importantes decisiones con objeto de superar el modelo USLE. Entre ellas, la de informatizar y actualizar la última versión de la USLE (1978), desarrollando un nuevo modelo empírico, que posteriormente fue denominado modelo RUSLE (*Revised Universal Soil Loss Equation*).

La RUSLE, mantuvo la estructura básica de la USLE, en la que está basada. La primera publicación del modelo RUSLE se remonta al trabajo de Renard et al. (1991) en el que se presentaron los resultados de un proyecto conjunto del ARS (*Agricultural Research Service*) y del SCS (*Soil Conservation Service*) de los EE.UU.; mientras su última actualización, el modelo RUSLE versión 2, data de 2008 (USDA-ARS, 2008a, b). El objetivo inicial de este proyecto fue la revisión del último manual del modelo USLE (*USDA Agriculture Handbook n° 537*) añadiendo y agrupando las mejoras y nuevas aplicaciones obtenidas desde la publicación del mismo en 1978. Posteriores investigaciones fueron modificando e incrementando los parámetros y la complejidad de cálculo de los mismos (Renard et al., 1994) hasta que Renard et al. publicaron en 1997 el primer manual completo del modelo (*USDA Agriculture Handbook n° 703*).

La primera versión de la RUSLE, además de su implementación sobre un soporte informático, lo que supuso un gran avance, introdujo algunas modificaciones para cada uno de los factores de la ecuación. Probablemente la más destacada fue el desarrollo de una serie de subfactores para el cálculo del factor C, algo similar a lo que ya sucedía en el caso del factor P en la USLE (Renard et al., 2011).

8.2.3. El factor P de la RUSLE

Los valores del factor P de la RUSLE están basados en las aproximaciones ya existentes en la USLE. Sin embargo, mientras los factores de la USLE estaban basados puramente en datos empíricos, valores recogidos en campo a partir de parcelas experimentales anteriormente descritas; Foster et al. (1997), en su trabajo de revisión del factor P de la USLE, combinan datos empíricos con predicciones de erosión. Apoyándose en la mucha bibliografía y teorías sobre la erosión que ya existían, los autores utilizan, junto a parcelas experimentales, información obtenida a partir de cuencas hidrológicas y de la utilización del modelo CREAMS (*Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*) para la predicción de la erosión (Knisel, 1980).

En este caso, fueron utilizadas parcelas experimentales en hasta dieciocho localizaciones para el análisis de la efectividad del laboreo en contorno (tabla 8.2). Los valores aportados por algunas de las parcelas ya fueron utilizados para el desarrollo de la USLE, como bien puede

observarse en las referencias bibliográficas de la tabla 8.2, también fueron instaladas nuevas parcelas. La dimensiones de las parcelas fueron variables entre las diferentes estaciones experimentales, presentando anchuras entre 1.83 y 45.72 m y longitudes entre 21.33 y 121.92 m. Hasta en seis localizaciones los estudios fueron realizados con simulaciones de lluvia, mientras en el resto se midió la erosión y tasas de escorrentía producida a partir de lluvia natural. Los manejos y prácticas de conservación variaron entre los diferentes estudios realizados. Las pendientes de las parcelas fueron variables pero siempre inferiores al 20%.

Tabla 8.2: Resumen de las características de las parcelas en las que se ha estudiado el efecto del laboreo en contorno en la escorrentía y pérdida de suelo.

Numero de estudio	Localización	Referencia	Dimensiones de la parcela				Tipo de estudio
			Longitud (m)	Anchura (m)	Superficie (m ²)	Pendiente (%)	
1	Auburn (Alabama)	Diseker y Yoder (1936)	15.24	4.6	70.10	0, 5, 10, 15, 20	Lluvia natural y simulada
2	Urbana (Illinois)	Van Doren et al. (1950)	54.86	16.15	885.99	2	Lluvia natural
3	Temple (Texas)	Hill et al. (1944)	*	*	40.47, 121.4 y 340	3.5	Lluvia natural
4	McCredie (Missouri)	Jamison et al. (1968)	128	31.7	4057.60	3.5	Lluvia natural
5	Morris (Minnesota)	Young et al. (1964)	22.86	4.11	93.95	4, 7.5, 10.5	Lluvia simulada
6	Batesville (Arkansas)	Hood y Bartholomew (1956)	27.43	9.14	250.71	4	Lluvia natural
7	Central (Illinois)	McIsaac (et al. (1987)	10.67	3.05	32.54	5	Lluvia simulada
8	Lincoln (Nebraska)	Jasa et al. (1986)	10.67	3.05	32.54	5	Lluvia simulada
9	Bethany (Missouri)	Smith et al. (1945)	82.3	13.72	1129.16	7	Lluvia natural
10	Guthrie (Oklahoma)	Daniel et al. (1943)	**	**	1011.7	7	Lluvia natural
11	Clarinda (Iowa)	Browning et al. (1948)	48.16	25.6	1232.90	9	Lluvia natural
12	Auburn (Alabama)	Nichols y Sexton (1932)	15.24	4.57	69.65	10, 15	Lluvia simulada
13	Concord (Nebraska)	Jasa et al. (1986)	10.67	3.05	32.54	10	Lluvia simulada
14	Arnot (New York)	Lamb et al. (1944)	94.49	6.4	604.74	11	Lluvia natural
15	Sioux City (Iowa)	Moldenhauer y Wischmeier (1960)	221.28	3.05	674.90	12	Lluvia natural
16	Zanesville (Ohio)	Borst et al. (1945)	221.28	1.82	402.73	13	Lluvia natural
17	Sussex (New Jersey)	Knoblauch y Haynes (1940)	21.34	4.11	87.71	16	Lluvia natural
18	Holly Springs (Mississippi)	McGregor et al. (1969)	21.34	45.72	975.66	4.2	Lluvia natural

*: Se trata de parcelas de las que solo se conoce su superficie.

**: Parcela de estudio de 1011.7 m², las distancias concretas de anchura y longitud se desconocen.

Las cuencas hidrológicas, estudiadas en cuatro localizaciones diferentes, presentaron dimensiones entre los 607 y los 29950 m² (tabla 8.3).

Tabla 8.3: Resumen de las características de las cuencas hidrológicas en las que se ha estudiado el efecto del laboreo en contorno en la escorrentía y pérdida de suelo.

Numero de estudio	Localización	Referencia	Dimensiones de las cuencas hidrológicas		Tipo de estudio
			Área (m ²)	Pendiente (%)	
1	Temple (Texas)	Hill et al. (1944)	607, 6070, 8903	3.5	Lluvia natural y simulada
2	Bethany (Missouri)	Smith et al. (1945)	18211, 29947	7	Lluvia natural
3	Clarinda (Iowa)	Browning et al. (1948)	8093.7, 12950	8	Lluvia natural
4	LaCrosse (Wisconsin)	Hays et al. (1949)	8903	15	Lluvia natural

Por último, Foster et al, (1997), utilizaron el componente de erosión y producción de sedimentos del modelo CREAMS (Knisel, 1980) para predecir valores de erosión y de emisión de sedimentos por regueros y cárcavas efímeras en varias cuencas hidrológicas simuladas.

El modelo CREAMS (Knisel, 1980) fue diseñado para evaluar la contaminación difusa en campos de cultivo, y se aplica en la simulación de la calidad del agua y para investigar las consecuencias medioambientales de distintas prácticas agrícolas. Los componentes del programa son: i) hidrología; ii) erosión y producción de sedimentos; iii) fertilizantes y agroquímicos (Knisel, 1980). El modelo trabaja a una escala espacial de cuenca y a una escala temporal de evento o de forma continua, pudiendo operar sobre largos periodos de tiempo que van desde los dos a los cincuenta años.

El componente erosión y producción de sedimentos tiene elementos para el flujo superficial (erosión en regueros y entre regueros), el flujo canalizado, como en terrazas de drenaje y cauces de hierba; y la deposición de sedimentos allí donde el agua se remansa (Almorox et al. 2010).

El diseño de las cuencas sobre CREAMS presentó dos planos laterales que confluían en forma de V. La escorrentía sobre los planos laterales de las cuencas fue encauzada dentro de los surcos de labor entre caballones que fueron espaciados 76 cm, mientras en el fondo de la vaguada se simuló el desarrollo de una cárcava. El modelo también considera el flujo entre regueros (Foster et al., 1997).

Fueron diseñadas diversas cuencas hidrológicas con diferentes longitudes de ladera y diferentes pendientes tanto en las laderas laterales como sobre el fondo de vaguada (Foster et al., 1997). Una de las cuencas diseñadas presentaba un 12% de pendiente en los planos laterales, mientras la pendiente a lo largo del fondo de vaguada fue del 6%; un segundo diseño presentó un 6% como pendiente sobre los planos laterales, mientras el fondo de vaguada tenía una pendiente del 4%. Respecto a las dimensiones de las diferentes cuencas simuladas, todas ellas presentaban 152 m a lo largo de la línea de máxima concavidad, modificándose las longitudes de las laderas. En el caso de la cuenca de mayores pendientes se determinaron dos anchuras diferentes para los planos laterales, 12.2 y 36.6 m. En el caso de la cuenca con menores pendientes, están anchuras se situaron en 12.2 y 61 m. Se determinó igualmente un valor del esfuerzo cortante crítico de 4.8 N m⁻² para simular un campo recién labrado (alta susceptibilidad a la erosión por flujo) (Foster et al., 1980 en Foster et al., 1997); mientras que dicho valor se elevó hasta los 9.6 N m⁻² una vez había pasado un mes desde la labor (moderada susceptibilidad a la erosión por flujo) (Foster et al., 1980 en Foster et al., 1997).

Las características de la precipitación simulada para el análisis fueron de 63.5 mm para el volumen total de lluvia, 40.6 mm de escorrentía total, 50.8 mm h⁻¹ como tasa de escorrentía máxima y 50 unidades EI (*ft tonf in acre⁻¹ h⁻¹*) para la erosividad de la lluvia. Valores todos ellos que representan la precipitación habitual de las simulaciones de lluvia utilizadas para los estudios sobre parcelas experimentales (Meyer, 1960 en Foster et al., 1997).

Para el análisis fueron considerados también hasta cuatro valores de pendiente en el interior de los surcos de labor: 0.5, 1, 2 y 4%, para las cuencas con pendientes menores, incluyéndose también el análisis del 6% de pendiente en el interior del surco para el caso de las cuencas simuladas de mayor pendiente.

Los valores de escorrentía total generada por la precipitación no fueron modificados en función de las características de la cuenca simulada, pese a que, según los modelos USLE/RUSLE, el laboreo en contorno tiene incidencia sobre la escorrentía generada, favoreciendo la infiltración y, con ello, reduciendo este valor. Por ello, los autores consideraron que el análisis con el modelo CREAMS subestimó el efecto del laboreo en contorno (Foster et al., 1997).

8.3. Valores del factor P para el laboreo en contorno

Por definición, el factor P o factor de prácticas de conservación, es el ratio de pérdida de suelo que se produciría aplicando cualquiera de las prácticas de conservación consideradas frente a la pérdida de suelo que se produciría si se aplicase el laboreo a favor de la máxima pendiente.

Las consideradas como prácticas de conservación del suelo afectan a la erosión del suelo a través de la modificación de los patrones de flujo sobre la ladera (Renard y Foster, 1983). Para los campos de cultivo son consideradas como prácticas de conservación: el laboreo en contorno, el cultivo en fajas, el cultivo en terrazas y los drenajes subsuperficiales, quedando excluidas las prácticas de conservación como el no laboreo, el laboreo reducido o el manejo de cubiertas, ya que éstas se consideran en el factor C de la ecuación.

El valor del factor P se calcula como el producto de los subfactores de cada una de las cuatro prácticas de conservación consideradas, ya que es común que se combinen estas. A modo de ejemplo, el laboreo en contorno puede aplicarse sobre terrazas o cultivo en fajas.

Fue Smith en 1941 quien introdujo por primera vez el concepto de prácticas de conservación en una de las múltiples ecuaciones precursoras de la USLE. En la misma, se representó el concepto de prácticas de conservación como el factor P dentro de la ecuación. Al factor P se le asignaron valores entre 0 y 1, considerando el valor 1, que no modifica el resultado final de la ecuación, en aquellas circunstancias en que se considera que no se aplica ninguna práctica de conservación sobre el suelo.

8.3.1. El laboreo en contorno y el factor P

Sobre las superficies relativamente planas, los patrones de flujo están condicionados por la microtopografía existente sobre el suelo. Cuando la dirección del laboreo orienta esta microfotografía, se induce una dirección preferente de flujo en el sentido de los surcos de labor, modificando los patrones de flujo sobre la ladera. Siempre que la dirección de la labranza no sea a favor de la máxima pendiente, se reducirá en mayor o menor medida la intensidad de la pendiente en el interior del surco por donde circula el flujo, reduciendo de esta manera su energía y con ello su capacidad erosiva y de transporte. El extremo de esta modificación es conseguir que la pendiente en el interior del surco disminuya hasta poder considerarse suficientemente plana, alcanzando el concepto de laboreo en contorno. En estas circunstancias no se producirá flujo en el interior del surco o este será despreciable. Por lo tanto, el laboreo en contorno reduce las tasas de erosión reduciendo la intensidad de la pendiente a lo largo de la trayectoria del flujo, lo que favorece la infiltración, disminuyendo la producción de escorrentía.

Los valores del factor P utilizados comúnmente en la USLE (Wischmeier y Smith, 1978) para el laboreo en contorno son casi iguales a los desarrollados por Smith y Whitt (1947, 1948). Cuando el laboreo fuese a favor de la pendiente, el valor de P sería igual a 1, ya que no se procedía de

ninguna manera particular para contrarrestar la erosión del suelo producida por la escorrentía. Pero no exclusivamente en estas circunstancias el valor de P sería 1. Cuando no existiese pendiente sobre el terreno, Smith y Whitt propusieron que el valor de P debiera ser igualmente 1, debido a que no puede definirse ninguna dirección de flujo y por lo tanto, no se puede actuar sobre su control. Por el contrario, en el caso de fuertes pendientes, por encima del 25%, propusieron igualmente un valor de 1 para el factor P, en este caso debido a una relación geométrica simple: ante esa pendiente, el surco clásico de 15 cm de altura no tiene capacidad de almacenamiento de agua, por lo que, asimismo, no supone ninguna medida de control de la escorrentía. A partir de los resultados obtenidos de las parcelas de erosión de los diferentes grupos de investigación se determinan los valores del factor P para pendientes intermedias. Van Doren et al. (1950) calibraron un valor del factor P de 0.6 para el 2% de pendiente, mientras Smith et al. (1945) asignaron un valor de 0.5 para pendientes del 7%. Con estas premisas, surge el planteamiento de que los efectos beneficiosos del laboreo en contorno se reducen conforme aumenta, tanto la pendiente, como la longitud de la ladera.

En la USLE se consideró una máxima eficacia del laboreo en contorno para pendientes entre el 3 y el 8%, descendiendo dicha eficacia y, por tanto, aumentando el valor del factor P, a partir del incremento de la pendiente. Respecto a la longitud de la ladera, Wischmeier y Smith (1978) establecen unos valores umbrales máximos en función de la pendiente, a partir de los cuales el laboreo en contorno podría producir pérdidas de suelo de igual o superior magnitud que el laboreo a favor de la pendiente (tabla 8.4). Wischmeier y Smith (1978) consideraron que las longitudes máximas se incrementarían en un 25% si la cubierta de residuos superara el 50%.

Tabla 8.4: Valores del factor P de la USLE para el laboreo en contorno en función de la pendiente y umbrales máximos de longitud de ladera tanto de la USLE como de la RUSLE.

Pendiente (%)	Valor P USLE	Longitud máxima (m) (USLE, 1978)	Longitud máxima (m) RUSLE (1997)
1.5	0.6	122	304.8
4.0	0.5	91	117
7.0	0.5	61	61
10.5	0.6	37	38
14.5	0.7	24	24
18.5	0.8	18	18
23.0	0.9	15	15

Por otro lado, diversos estudios de campo han puesto de manifiesto que la eficacia del laboreo en contorno se reduce de forma directa con la intensidad de las precipitaciones (ver, por ejemplo, Moldenhauer y Wischmeier, 1960; Jasa et al., 1986; Augustinus y Nieuwenhuys, 1986), sin restar una gran efectividad a la técnica de conservación, siendo el laboreo en contorno efectivo, en mayor o menor medida, salvo cuando el índice de erosividad E_i es grande y la tasa de infiltración muy pequeña (Moldenhauer y Wischmeier, 1960), situación que solo se produce durante eventos extremos de precipitación (Hill et al., 1944; Jamison et al. 1968). Por ello, en la RUSLE (Foster et al., 1997) la determinación del factor P para el laboreo en contorno se realiza con respecto a la erosividad máxima esperada en episodios aislados de lluvia, en lugar de los promedios anuales de erosividad R , utilizando el índice de erosividad E_i calculado para el episodio de lluvia de máxima precipitación con un periodo de retorno de 10 años (Renard et al., 1994).

Por lo que, mientras los valores umbrales de longitud máxima asociados a la pendiente en el caso de la USLE (tabla 8.4) están basados en las observaciones de campo y el juicio que sobre estas se hace, en el caso de la RUSLE están calculados a partir de la eq. 8.2 (Foster et al. 1982).

$$\lambda_c = 20182 n_t^{1.5} * (s^{1.1667} Q)^{-1} \quad \text{eq. 8.2}$$

Siendo λ_c : el valor umbral de la longitud asociado a la pendiente; n : número de Manning; s : pendiente expresada con el seno del ángulo de la pendiente; y Q : cantidad de escorrentía a partir del índice de erosividad E calculado para el episodio de lluvia de máxima precipitación con un periodo de retorno de 10 años. El valor 20182 fue obtenido de la calibración de la propia ecuación considerando una longitud de 200 pies, para una pendiente del 7%.

Una vez incluida esta modificación para la determinación de los valores del factor P se observa, tabla 8.4, que los valores umbrales de longitud de la RUSLE son muy próximos a los propuestos por Wischmeier y Smith (1978), excepto para las pendientes inferiores al 4%. En este caso, se fijó un valor máximo de 1000 pies (304.8 m) como el mayor de longitud umbral.

La RUSLE, como novedades respecto a la USLE, además de considerar la erosividad máxima de la lluvia para un periodo de retorno de 10 años, considera también en el cálculo: el grupo hidrológico del suelo, la pendiente a lo largo de los surcos de labranza y la altura de los caballones.

Foster et al. (1997) consideraron, a partir de información obtenida del modelo CREAMS (Knisel, 1980), que puede asumirse una pendiente máxima en el surco de hasta 0.5% para seguir obteniendo la máxima eficacia aplicando el laboreo en contorno. En sus simulaciones utilizando el modelo CREAMS observaron que a medida que aumentaba la pendiente en el interior de los surcos se incrementaba la superficie de drenaje aguas arriba de la cabecera de los canales sobre los planos laterales de la cuenca, acortándose la longitud del canal de fondo de vaguada, por lo que finalmente se asumió, como el mejor resultado respecto a la protección frente a la erosión, una pendiente máxima en el interior del surco del 0.5%.

Respecto a la altura de los caballones, Foster et al. (1997) realizaron diversas simulaciones con el modelo CREAMS utilizando caballones desde 1.27 cm hasta más de 15 cm de alto. Los datos mostraron, como no podía ser de otra manera, una mayor efectividad del laboreo en contorno en las situaciones en las que se aplicaron caballones de mayor altura sobre las cuencas simuladas. Con anterioridad ya se había estudiado este efecto, Borst et al. (1945), llegaron a la misma conclusión desarrollando esta misma comparativa pero sobre parcelas de erosión, aunque esta variable no fue considerada para la determinación del valor del factor P de la USLE.

En la figura 8.1, tomada del manual de la RUSLE (*USDA Agriculture Handbook n° 703*). (Foster et al. 1997) se representan los datos obtenidos de la experimentación para la obtención del valor del factor P de la RUSLE. Se trata de una de las múltiples combinaciones para obtener los valores del factor P , que se presenta a modo de ejemplo.

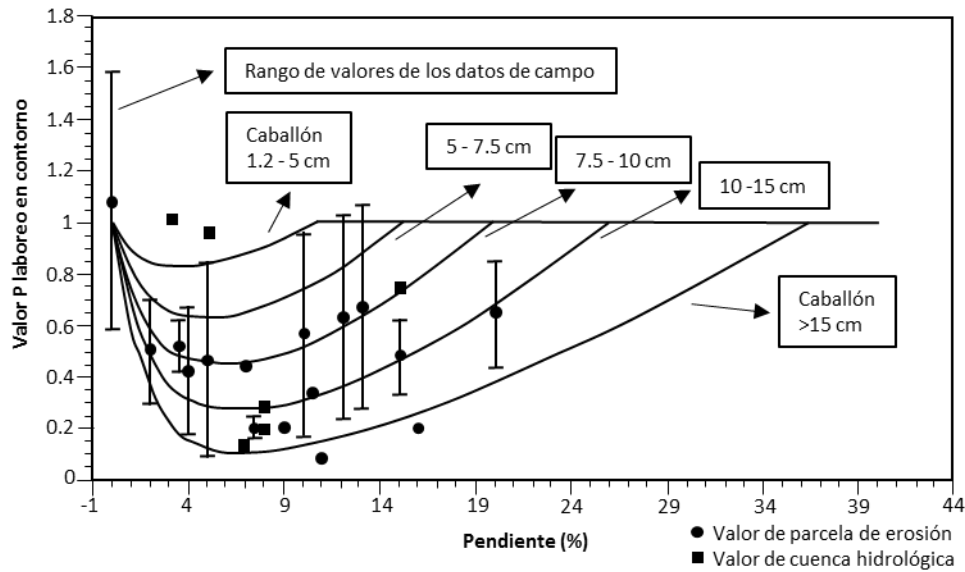


Figura 8.1: Efecto del laboreo en contorno sobre el suelo. Tomada de Foster et al., 1997.

En la figura el valor de P varía en función de la pendiente de la ladera y de la altura del caballón, mientras resultan valores fijos para el cálculo los del índice de erosividad EI, calculado para el episodio de lluvia de máxima precipitación con un periodo de retorno de 10 años, las características del cultivo, el grupo hidrológico del suelo y la pendiente en el surco, valores que corresponden, en este ejemplo, a 100 pies tonf pulgadas acres⁻¹ h⁻¹, cultivo en hilera, grupo hidrológico C y 0.5% de pendiente, respectivamente. Al estar el modelo RUSLE informatizado, es sencillo modificar los valores de erosividad de la precipitación, las características del suelo y del cultivo, así como la pendiente en el surco para obtener los distintos valores del factor P.

En el propio manual de la RUSLE se indica que las zonas de vaguada de las laderas tenderán a desarrollar cárcavas efímeras por la concentración del flujo en dicha vía de drenaje natural, se aplique o no laboreo en contorno. Sin embargo, si se aplica laboreo en contorno, si la pendiente en el surco es de 0.5% o inferior los depósitos que se producen en los surcos compensarán la pérdida de suelo producida por el desarrollo de la cárcava, según simulaciones a partir del modelo CREAMS (Foster et al., 1997).

Pese a los múltiples beneficios que emanan del desarrollo de la RUSLE respecto al laboreo en contorno, múltiples autores indican que la aplicación única de la técnica resulta a menudo insuficiente para un control efectivo de la erosión, tanto previa como posteriormente a la publicación de este modelo (Hill et al., 1944; Smith et al., 1945; Jamison et al., 1968; Flanagan y Livingston, 1995; Hatfield et al., 1998; proyecto SOCO -Sustainable Agriculture and Soil Conservation-, 2009), indicándolo en el propio manual de la RUSLE (*USDA Agriculture Handbook n° 703*) y en la versión revisada, RUSLE versión 2 (USDA-ARS, 2008a,b).

8.4. Contradicción entre los postulados del factor P de la USLE/RUSLE y los resultados obtenidos en este estudio

El modelo teórico desarrollado en este trabajo, que surge del análisis de la influencia que la rugosidad orientada ejerce sobre las respuestas hidrológicas y erosivas de los suelos agrícolas (ver apartado 7.5.3, figura 7.31), contradice la efectividad del laboreo en contorno que impulsan los modelos USLE/RUSLE y que se encuentra plenamente vigente en la literatura científica actual (ver, por ejemplo, Barton et al., 2004; Quinton y Catt, 2004; Shi et al., 2004; Stevens et al., 2009, Liu et al., 2014a; Liu et al, 2014b).

La falta de efectividad del laboreo en contorno según las conclusiones alcanzada en esta Tesis no se produce solo asociada a episodios de precipitación extremos, condiciones en las que los propios Wischmeier y Smith (1978) afirmaron que la labranza a nivel ve fuertemente reducido su grado de protección sobre el suelo, produciendo incluso magnitudes de erosión superiores al laboreo a favor de la máxima pendiente; sino en todos los episodios de erosión estudiados, sea cual fuere la precipitación desencadenante del mismo: de alta, moderada o incluso baja intensidad.

En este trabajo se ha observado que allí donde el laboreo fue en contorno u oblicuo, al desencadenarse erosión por flujos concentrados sobre laderas agrícolas, las tasas de erosión que se producen son mayores que ante circunstancias equivalentes pero donde el laboreo fue a favor de la máxima pendiente (ver apartado 7.6).

Las diferencias observadas se han justificado en el diferente proceso erosivo que se induce sobre las laderas con una dirección u otra de laboreo. Si el laboreo es a favor de la máxima pendiente, el proceso de incisión de cabeceras es hortoniano, el umbral que debe superar la escorrentía para que incida un canal es el del esfuerzo cortante crítico. Si, por el contrario, el laboreo es en contorno, el proceso de incisión de cabeceras es por desbordamiento, el umbral que debe superar la escorrentía en ese caso es la altura del caballón.

Por lo tanto, cabe preguntarse por qué se produce esta contradicción entre la eficacia del laboreo en contorno que promulgan los modelos USLE/RUSLE y la literatura sobre la materia hasta el momento y los resultados de este trabajo.

Ya han sido señaladas en la literatura internacional una serie de limitaciones a la hora de la aplicación de la propia USLE, así como posteriormente de la RUSLE, (ver, por ejemplo, Wischmeier, 1976; FAO, 1996; Toy y Renard, 1998). En este contexto, resulta conveniente destacar las siguientes y profundizar sobre ellas:

- a) Los resultados proporcionados por la RUSLE son estimaciones de pérdida de suelo y no datos absolutos de pérdida de suelo. Las estimaciones de pérdida de suelo corresponden a tasas promediadas para largos periodos de tiempo, con objeto de obviar la variabilidad temporal de las precipitaciones, fundamentales para el desarrollo de los eventos erosivos extremos.
- b) El modelo únicamente considera la pérdida de suelo ocasionada por procesos de erosión difusa y en regueros, por lo que queda sin evaluar el posible efecto de procesos tales como sistemas de cárcavas efímeras o estables, movimientos en masa, incisión de canales, etc., que ocurren a escala de cuenca y que ocasionan la mayor parte de la erosión total que se produce sobre los suelos.

Estas limitaciones están originadas por el propio diseño experimental, basado en una gran cantidad de información pero que procede en su inmensa mayoría de parcelas de erosión de tamaño medio, parcelas tipo USLE.

8.4.1. La importancia de los eventos meteorológicos desencadenantes de erosión por flujos concentrados

Obviar la variabilidad temporal de las precipitaciones, como se incorpora al aplicar los modelos USLE/RUSLE, elimina la estimación de la erosión del suelo por flujos concentrados. El intento de aplicar la USLE/RUSLE para la estimación de la erosión de suelo producida por los eventos meteorológicos desencadenantes de erosión por flujos concentrados, es decir, desencadenantes de episodios erosivos extremos, produce importantes errores en los resultados obtenidos debido a que el modelo no considera directamente la escorrentía superficial, la cual resulta clave en el proceso erosivo (Kinnell, 2005).

Además, la distribución de las precipitaciones y de la erosividad de la lluvia en condiciones climáticas mediterráneas se caracteriza por una acusada variabilidad, tanto a nivel interanual como estacional. Respecto a la distribución irregular de la erosividad de la lluvia a lo largo del año, han sido identificados dos escenarios de máxima intensidad erosiva: el primero de los escenarios, denominado situación de temporal, corresponde a precipitaciones de carácter ciclónico propias de las estaciones invernales, en las que se encadenan varios episodios de lluvia consecutivos, normalmente de intensidad baja o moderada. En estas circunstancias, el perfil del suelo se satura y las tasas de infiltración se reducen drásticamente, de manera que cualquier precipitación es suficiente para generar importantes tasas de escorrentía y erosión; el segundo escenario, responde a episodios de lluvia de moderada y alta intensidad, generalmente asociados a células convectivas de desarrollo vertical. Las elevadas tasas de escorrentía y sedimentos se deben en este caso a que la intensidad de lluvia supera la capacidad de infiltración de la capa superficial del suelo.

En este segundo escenario se incluyen los eventos de precipitación extrema. Resulta indudable que, en condiciones climáticas mediterráneas, los eventos de precipitación extrema tienen un gran peso sobre las tasas anuales de erosión hídrica del suelo, y que, debido a la influencia del cambio climático, cada vez van a tener más peso sobre la erosión de los suelos agrícolas durante el transcurso del próximo siglo (ver apartado 2.6). Sin embargo, no resulta imprescindible que los eventos de precipitación sean extremos para que se desencadenen episodios erosivos extremos.

En ambas circunstancias se ha documentado en esta Tesis el desarrollo de erosión por flujos concentrados, regueros y/o cárcavas efímeras (episodios erosivos extremos), lo cual implica que las conclusiones obtenidas hasta el momento no se circunscriben exclusivamente a condiciones climáticas mediterráneas sino que también pueden asumirse para cualquier otro clima más húmedo, aunque en estos no sean frecuentes las precipitaciones de elevada intensidad.

La importancia de los eventos singulares de precipitación intentó reflejarse en el desarrollo de la MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*) (Williams y Berndt, 1977). La MUSLE, que parte de la USLE, intenta superar la limitación de esta última respecto a su cálculo de tasas promediadas para largos periodos de tiempo, diseñando una ecuación que pudiese ser utilizada para eventos erosivos puntuales. En el desarrollo inicial de la MUSLE fue sustituido el factor de erosividad de la lluvia (factor R) por el producto del volumen de precipitación del evento concreto estudiado y de la escorrentía generada en dicho evento con objeto de predecir la erosión del suelo para eventos erosivos concretos. Sin entrar a considerar la consecución del objetivo perseguido en el desarrollo de la MUSLE, se ha de reseñar que en el modelo MUSLE se consideran los valores del factor de prácticas de conservación (factor P) calculados para la USLE.

En resumen, obviar la variabilidad temporal de las precipitaciones, como hacen los modelos USLE/RUSLE provoca diluir la importancia de estos eventos singulares en los valores promedio anuales de precipitación, restándoles importancia y considerándolos, cuando se cuantifica la

erosión asociada a los mismos, como singularidades no representativas del global de valores de erosión medidos.

En contraposición a estos eventos meteorológicos desencadenantes de erosión por flujos concentrados, se sitúan los episodios de moderada y baja intensidad de lluvia que producen pérdidas de suelo, fundamentalmente, por erosión difusa, y que son aquellos que mayoritariamente han sido cuantificados en las parcelas de erosión y con cuya información se han desarrollado de los modelos USLE/RUSLE.

8.4.1.1. Importancia de los episodios de moderada y baja intensidad en comparación con los episodios de lluvia de elevada intensidad: efectividad del laboreo en contorno en ambos escenarios

A la hora de estimar tasas promediadas para largos periodos de tiempo aplicando los modelos USLE/RUSLE se considera:

- a) Que el laboreo en contorno presenta su máxima eficacia en el control de la escorrentía y la erosión ante precipitaciones de baja o moderada intensidad para laderas con pendientes entre el 3 y el 8% y de longitudes no superiores a los 22 m. La aplicación del laboreo en contorno presenta una mayor eficacia sobre el control de la escorrentía superficial que sobre la erosión del suelo.
- b) Que la efectividad del laboreo en contorno se reduce de forma directa con el aumento de la intensidad de las precipitaciones (ver, por ejemplo, Moldenhauer y Wischmeier, 1960; Jasa et al., 1986; Augustinus y Nieuwenhuyse, 1986), con el aumento de la longitud de la ladera y de la pendiente, llegando a ser totalmente inefectivo ante eventos extremos de precipitación, situaciones ante las cuales el laboreo en contorno podría producir pérdidas de suelo de igual o superior magnitud que el laboreo a favor de la pendiente (Wischmeier y Smith, 1978). También resulta inefectivo para pendientes superiores al 25% (Smith y Whitt, 1947).

Sin embargo, las tasas de erosión que se producen en episodios de moderada y baja intensidad de precipitación sin aplicar ninguna técnica para el control de la erosión, es decir, labrando a favor de la máxima pendiente, se sitúan dentro de los valores de pérdida tolerable de suelo*, como fue cuantificado en las parcelas de erosión tipo USLE instaladas en La Finca Experimental La Higuera (De Alba, 1998; Alcázar, 2013), en condiciones climáticas mediterráneas.

La tasa de erosión obtenida en La Higuera fue de $3.37 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ año}^{-1}$ (Alcázar, 2013) y se obtuvo a partir de información recogida en parcelas de erosión tipo USLE (22 x 1.5 m) con pendientes del 9%, durante un periodo de 17 campañas agrícolas (1993-1994 a 2009-2010). Las tasas de erosión se obtuvieron en parcelas de erosión bajo condiciones de manejo del suelo de laboreo convencional con barbecho blanco, resultando el manejo más susceptible a la erosión al encontrarse el suelo desnudo durante buena parte de su ciclo agronómico.

Por lo tanto, según los valores obtenidos las tasas de erosión que se producen en las citadas condiciones no suponen un grave problema desde el punto de vista de la conservación del recurso edáfico, incluso si no se aplica técnica alguna para el control de la erosión.

*: Si se considera un perfil de entre 50 y 100 cm, similares a los presentes en los suelos estudiados en este trabajo, incluso en condiciones de sustrato desfavorable (ver tabla 2.1).

Igualmente sucede en el caso de los coeficientes de escorrentía. Los coeficientes medios de escorrentía anual que se producen en episodios de moderada y baja intensidad de precipitación sin aplicar ninguna técnica para el control de la erosión, se limitan al 3.4% de la precipitación

total, como fue cuantificado en las parcelas de erosión tipo USLE instaladas en La Finca Experimental La Higueruela para la misma serie temporal de 17 campañas agrícolas, en condiciones de barbecho blanco con laboreo convencional (Alcázar, 2013).

En conclusión, si se aplica el laboreo en contorno como práctica de conservación sobre laderas agrícolas:

- Este será muy eficaz ante precipitaciones de baja o moderada intensidad (Wischmeier y Smith, 1978), condiciones donde las tasas de erosión producidas y los coeficientes de escorrentía, si no se aplicase, fueran poco relevantes.
- Disminuirá su eficacia, produciendo pérdidas de suelo de superior magnitud al laboreo a favor de la máxima pendiente, ante precipitaciones de alta intensidad (Wischmeier y Smith, 1978), aquellas que desencadenan procesos de erosión por flujos concentrados, proceso erosivo que produce la mayor parte de las tasas anuales de erosión hídrica del suelo.

8.4.2. La importancia de la escala en el estudio de los procesos erosivos: consecuencias sobre la determinación de la efectividad del laboreo en contorno

Diferentes autores han demostrado que los procesos hidrológicos y geomorfológicos que controlan los procesos erosivos son dependientes de la escala (ver, por ejemplo, Walling, 1983; Lal, 1990; Evans, 1993; Osterkamp y Toy, 1997; Poesen y Hooke, 1997; Cameraat, 2002 y 2004; De Vente y Poesen, 2005 en Boix-Fayos et al., 2006). A su vez, también se han puesto de manifiesto las limitaciones de extrapolar datos de una escala a otra (ver, por ejemplo, Govers, 1991; Mannaaerts, 1992; Cammeraat, 2002; Leser et al., 2002; en Boix-Fayos et al., 2006). De acuerdo con García Ruíz y López Bermúdez (2009), un *upscaling* lineal desde la escala de detalle a otra más gruesa es imposible, ya que en los procesos erosivos hay muchos umbrales y procesos no lineales implicados a diferentes escalas.

No obstante, a pesar de la reconocida influencia de la escala a la que se estudian los procesos erosivos sobre las pérdidas de suelo, existen pocos estudios que aporten información cuantitativa sobre este aspecto (Cerdà, 2006; García Ruíz y López Bermúdez, 2009).

El modelo USLE abordó la influencia de la dirección del laboreo en la generación de escorrentía y erosión partiendo de valores obtenidos a escala de parcela fundamentalmente de tamaño medio (superficie menor de 200 m²) y extrapolando posteriormente los resultados obtenidos al resto del paisaje. El diseño experimental más común consistió en una parcela de 1.83 m de ancho y 22.13 m de longitud.

Con este tamaño de parcela se registra la pérdida de suelo resultante de la acción conjunta de procesos de erosión difusa (*splash erosion* y *overland flow*) y de erosión por pequeños regueros. Sin embargo, las parcelas tipo USLE, por sus dimensiones, no permiten el desarrollo de formas erosivas mayores que, allí donde aparecen, provocan los volúmenes más importantes de pérdida de suelo, llegando a producir entre el 80 y el 90% del volumen total de pérdida de suelo (Govers y Poesen, 1988; Poesen et al, 1997; De Alba, 1998) (ver apartado 2.3).

Cabe recordar, que el estudio de los fenómenos de reguerización y/o acarcavamiento de las laderas agrícolas en condiciones climáticas mediterráneas que se ha realizado en este trabajo ha dado como resultado la diferenciación de dos morfologías erosivas: redes confinadas de regueros y redes dendríticas; que se desarrollan asociadas a dos procesos erosivos diferentes: hortoniano y por superación de los caballones y concentración progresiva aguas debajo de la escorrentía superficial, respectivamente; procesos condicionados por la rugosidad orientada inducida sobre la ladera: a favor de la máxima pendiente y en contorno u oblicua, respectivamente.

En ambos procesos ha podido determinarse las distancias colectoras medias necesarias para que se produjese el inicio de los regueros, bien por incisión de cabeceras en los procesos hortonianos, bien por superación de los caballones (ver apartado 7.5.1.1.). La distancia colectora media necesaria para la incisión de la cabecera de un reguero en las laderas labradas a favor de la máxima pendiente fue de 33.46 m, mientras en el caso de las laderas labradas en contorno u oblicuamente a la máxima pendiente fue de 16.05 m, como puede observarse en la tabla 8.5. Así mismo, pueden observarse los valores extremos de la serie para ambas morfologías, cuyos valores mínimos fueron 4.66 y 1.92 m, siendo los máximos de 97.11 y 54.40 m, respectivamente.

Tabla 8.5: Distancia colectora media para los casos de regueros confinados y dendríticos atendiendo a sus diferentes procesos de formación. La diferencia de los valores medios presenta significación estadística a nivel $p < 0.05$.

Morfología de las redes de regueros	Dirección de la labor	Número de casos	Distancia media (m)	Valores mínimos y máximos de la serie (m)
Dendrítica	En contorno/oblicua	53	16.05	1.92-54.40
Confinada	A favor de la pendiente	104	33.46	4.66-97.11

En función de los valores de la tabla 8.5, las parcelas de erosión de tamaño medio tipo USLE, en las cuales, frente a diferentes longitudes, la anchura común es de 1.8 m, no permiten el desarrollo de regueros, si la dirección de la labor es perpendicular a la máxima pendiente o próxima a dicha perpendicularidad, al impedir la concentración lateral de flujos necesaria para que incidan cabeceras de canales. Si fuese considerada la distancia mínima colectora para la incisión de regueros en laderas labradas en contorno, 1.92 m, en las parcelas de erosión, en alguna circunstancia excepcional, podrían llegar a desarrollarse regueros, como bien observaron Wischmeier y Smith (1978). Sin embargo, también existe el extremo opuesto, en el que serían necesarias anchuras de más de 50 m en las laderas para permitir los procesos de concentración lateral de escorrentía que diesen lugar a la erosión por flujos concentrados sobre superficies labradas en contorno, distancias que no se representan en las parcelas tipo USLE. Por lo tanto, el rango de casuísticas en las cuales podría desarrollarse erosión por flujos concentrados en parcelas tipo USLE labradas en contorno es muy reducido, con lo que resulta una herramienta experimental del todo inadecuada para evaluar la eficacia de dicha práctica de conservación.

Algo similar sucede en el caso de los regueros confinados en base a los valores obtenidos en esta Tesis. Mientras las parcelas de erosión tipo USLE presentaban comúnmente longitudes de 22.13 m, la distancia colectora media para que se produzca una incisión en laderas labradas a favor de la máxima pendiente fue de 33.46 m. En este caso, haciendo referencia a la distancia colectora mínima medida en campo, 4.66 m, la utilización de las parcelas de erosión tipo USLE si permite el desarrollo de regueros cuando se labra a favor de la máxima pendiente en un mayor rango de casuísticas que cuando el laboreo es en contorno. Los trabajos de Morgan (1986) y de Mutchler et al. (1988) abundan en esta idea, reduciendo la longitud necesaria para el desarrollo de regueros en parcelas experimentales a 10 m.

Por todo ello, simular un laboreo en contorno en una parcela de erosión tipo USLE resulta del todo inadecuado, pudiendo llegar a afirmar que aplicando laboreo en contorno no se produce desarrollo de regueros prácticamente bajo ninguna circunstancia, mientras sí que puede desencadenarse este tipo de formas erosivas si la dirección del laboreo es a favor de la máxima pendiente. Esta conclusión, que es abrazada por el modelo USLE, fue establecida sin considerar que la escala de parcela de erosión es absolutamente inadecuada para poder plantear dicha comparativa, por las razones anteriormente expuestas.

Esta diferencia en los procesos erosivos que culmina con magnitudes superiores de pérdida de suelo allí donde el laboreo es en contorno, no es una excepción asociada a unas condiciones extremas de precipitación exclusivamente, como se indica en el manual de la USLE, sino que se produce de forma generalizada cada vez que se originan episodios erosivos extremos, no siempre ligados, como ya se ha visto, a eventos de precipitación extrema. Es la escala de las parcelas de erosión la que minimiza el desarrollo de las redes de regueros dendríticas cuando el laboreo es en contorno, falseando las condiciones reales que se originan sobre las laderas agrícolas al limitar la distancia colectora necesaria para desencadenar la incisión de regueros.

A todo ello se une que, además de no permitir el desarrollo de regueros y cárcavas, o limitarlos severamente, cuando se desencadenan eventos erosivos extremos las instalaciones de campo son generalmente desbordadas (Torri et al., 1999; Coppus y Imeson, 2002), por lo que las pérdidas de suelo de los eventos erosivos más importantes no son cuantificadas y consideradas de forma adecuada.

En resumen, las dimensiones de las parcelas de erosión diseñadas, tipo USLE, no permiten el desarrollo de cárcavas efímeras, ni en gran medida de regueros (formas erosivas mayores) que, allí donde aparecen, provocan los volúmenes más importantes de pérdida de suelo. En el caso de los regueros, el uso de parcelas de erosión tipo USLE permite el desarrollo, de forma limitada, de estas formas erosivas, siempre y cuando el laboreo sea a favor de la máxima pendiente; mientras que restringe severamente el desarrollo de regueros cuando la dirección de laboreo considerada es en contorno, debido a su escasa anchura. Por lo tanto, no es posible efectuar una comparativa real de la eficacia del laboreo en contorno respecto al laboreo a favor de la máxima pendiente como técnica para el control de la erosión y la escorrentía a partir de parcelas de erosión tipo USLE. No incluir la cuantificación de la pérdida de suelo debido al desarrollo de estas morfologías erosivas mayores como objetivo prioritario en el diseño experimental supone una importante deficiencia relacionada con la escala de trabajo planteada.

En el posterior desarrollo de la RUSLE se asumió que existía esta importante limitación producida por la escala del diseño experimental. Sin embargo, no se cuestionaron, en ningún momento, las afirmaciones derivadas del desarrollo de la USLE respecto a las bondades del laboreo en contorno como técnica para el control de la escorrentía y la erosión. Dichas bondades se reforzaron sobre un nuevo diseño experimental, que consistió en la utilización, de nuevo, de parcelas de erosión, cuya información fue complementada con aquella procedente de cuencas hidrológicas y de predicciones de erosión a partir de la utilización del modelo CREAMS (Knisel, 1980), con objeto de superar las limitaciones de la escala anteriormente citadas.

En este caso, las parcelas de erosión presentaron, en algunos casos, una mayor superficie, tratándose de parcelas con dimensiones superiores a los 200 m² en hasta diez de las dieciocho localizaciones utilizadas (tabla 8.2). Este aumento de las superficies de estudio afectó fundamentalmente a las longitudes de las parcelas que fueron muy heterogéneas, superando los 22 m de longitud en ocho de las dieciocho localizaciones. Sin embargo, las anchuras de las parcelas volvieron a ser muy limitadas, superando los 10 m de anchura tan solo en cinco de las dieciocho localizaciones, siendo sus anchuras de 13.72, 16.15, 25.6, 31.7 y 45.72 m.

Nuevamente la mayoría de las parcelas experimentales no tenían en su anchura la distancia colectora necesaria para permitir la superación de los caballones allí donde el laboreo fue en contorno: 16.05 m (tabla 8.5); mientras lo que si se aumentó en mayor proporción fueron las longitudes de las parcelas. De esta manera, seguía limitada la posibilidad de que se iniciase un reguero por superación del caballón, allí donde el laboreo fue en contorno; pero, al aumentar la longitud de las mismas, se aumentó la posibilidad de que se produjesen incisiones en aquellas en que el laboreo fue a favor de la máxima pendiente. Por ello, no debieron desarrollarse sistemas de regueros en aquellas parcelas labradas en contorno, por una limitación de escala;

sin embargo, el número de regueros debió ser superior en las que fueron labradas a favor de la máxima pendiente (superior a los regueros originariamente cuantificados en los casos de la USLE), ahondando en la misma conclusión de origen, si cabe, aun con mayor énfasis, aunque la parcelas utilizadas no permitiesen establecer este tipo de comparaciones.

A estas nuevas parcelas, se añadió la información procedente de cuatro cuencas hidrológicas (tabla 8.3) con objeto de considerar formas erosivas mayores. No obstante, las comparaciones directas entre las pérdidas de suelo producidas con laboreo a favor de la pendiente y con laboreo en contorno resultaron imposibles para las cuencas estudiadas, hecho que reconocen los autores (Foster et al., 1997) en el propio manual de la RUSLE (*USDA Agriculture Handbook n° 703*). Por ejemplo, en el campo experimental de Clarinda (Iowa), las dos cuencas estudiadas presentaron diferente rotación de cultivos. En Lacrosse (Wisconsin) se compararon datos de parcelas experimentales con los datos obtenidos a escala de cuenca hidrológica para determinar el valor del factor del laboreo en contorno, mientras que en Bethany (Missouri) la cuenca labrada en contorno presentaba una extensa red de canales cubiertos por vegetación que hizo que los valores de erosión de suelo fueran inusualmente bajos, mientras que la cuenca labrada a favor de la pendiente presentó una importante erosión que se produjo por el desarrollo de una cárcava efímera en la cual la pérdida de suelo fue cuantificada a la salida de la cuenca pero no estimada con la RUSLE. Por último, en Temple (Texas), las áreas de las cuencas no eran equivalentes, lo que terminó aportando valores muy diferentes de escorrentía y pérdida de suelo. Todas estas circunstancias hacen que los valores obtenidos a partir de las cuencas hidrológicas deban ser considerados con cautela, según los propios autores (Foster et al., 1997).

Por último, fue utilizado el modelo CREAMS para simular tasas de erosión y escorrentía sobre cuencas hidrológicas ficticias en las condiciones anteriormente descritas (ver apartado 8.2.3.). Los resultados reafirmaron la validez del laboreo en contorno, pero además, a partir de las predicciones de pérdida de suelo obtenidas se concluyó que una pendiente máxima de 0.5% en el surco resultaba la óptima para obtener una excelente protección del suelo mediante el laboreo en contorno (Foster et al., 1997).

En este caso, los resultados obtenidos mediante la utilización del módulo de erosión del modelo CREAMS (Knisel, 1980) resultan cuestionables desde el punto de vista de la evaluación de la eficacia del laboreo en contorno como técnica de conservación del suelo por diferentes razones. Por un lado, el diseño experimental para las simulaciones con CREAMS en el que se representa una cuenca hidrológica con dos planos laterales en forma de V, obvia la microtopografía irregular existente sobre las laderas agrícolas reales. Esta microtopografía irregular provoca pequeñas localizaciones de cota inferior en el interior de los surcos donde confluyen flujos laterales de sentidos opuestos, produciéndose acúmulos de agua que en determinadas circunstancias provocan la superación del caballón o su ruptura con el consecuente inicio de un reguero. Al considerar planos perfectos, se realiza una abstracción que en nada se asemeja a las condiciones reales de campo. Por otro lado, el modelo CREAMS describe la tasa de erosión entre regueros o por flujo laminar usando una de las variaciones de la MUSLE (*Modified Universal Soil Loss Equation*), la desarrollada por Foster et al. (1980) (Almorox et al. 2010). Sin embargo, cabe recordar, que los diferentes desarrollos de la MUSLE inciden sobre el factor R, erosividad de la lluvia, pero no modifican el factor de prácticas de conservación, factor P, cuyos valores son tomados de la USLE.

Partiendo de toda esta información, la RUSLE establece nuevamente el laboreo en contorno como una de las más elementales prácticas de conservación, que resultará más o menos efectivo en función de las características de la pendiente y la longitud de la ladera, así como de las características de la precipitación, del suelo, del cultivo y de la altura de los caballones.

Sin embargo, si las parcelas de erosión utilizadas no permiten establecer una comparativa entre las direcciones de laboreo óptimas para la conservación del recurso edáfico, como ya se ha indicado con anterioridad, y los valores de las cuencas hidrológicas deben ser tomados con cautela, como bien indican los propios autores (Foster et al., 1997); la eficacia del laboreo en contorno establecida por la RUSLE quedaría sostenida únicamente por las estimaciones de erosión efectuadas en cuencas hidrológicas simuladas a partir del modelo CREAMS, con todas las implicaciones que supone sostener la eficacia del laboreo en contorno exclusivamente a partir de un modelo de erosión de base física, sin datos de campo que lo validen, además de las limitaciones del modelo anteriormente citadas.

Las posteriores modificaciones que ha sufrido la RUSLE, que cristalizaron en el desarrollo de una segunda versión del programa, RUSLE2 (USDA-ARS, 2008a, b), no supusieron nuevos diseños experimentales, ni modificaciones respecto a la consideración de la eficacia del laboreo en contorno.

Pese a todo ello, cabe recordar que los modelos USLE/RUSLE son los más ampliamente utilizados para la medición de la erosión hídrica a escala internacional y nacional en la actualidad (Eckelmann et al., 2006 en Martín Fernández y Martínez Núñez, 2011). Es más, en el caso de España, así como en otros muchos países, el laboreo en contorno resulta de obligado cumplimiento según las distintas normativas legales vigentes (para el caso español ver apartado 2.7).

De hecho, en la actualidad es común encontrar en la literatura estudios recientes sobre la influencia de la dirección del laboreo en la generación de las tasas de erosión partiendo de valores obtenidos a escala de parcelas de tamaño medio (superficie menor de 200 m²) e incluso de microparcels, a partir de lluvias naturales o de simulaciones de lluvia, en los que se extrapolan posteriormente los resultados obtenidos al resto del paisaje (ver, por ejemplo, Barton et al., 2004; Liu et al., 2014a, Liu et al., 2014b, Wang et al., 2017).

En el trabajo de Barton et al. (2004) se instalaron hasta 30 parcelas de erosión, 20 de 24 m² (8 x 3 m) y 10 de 7.2 m² (6 x 1.2 m). Por tanto, el diseño experimental no permite establecer la efectividad del laboreo en contorno como ya se ha expuesto con anterioridad. Además, que se instalasen 10 parcelas con superficie menor respondió, no a un criterio experimental, sino a falta de espacio sobre el terreno. El mismo error de partida se reproduce en el trabajo de Wang et al. (2017), en el cual se utilizan parcelas de erosión de 4 m de largo y 1 m de ancho (foto 8.4) para comparar el control que ejercen sobre los efectos erosivos cuatro operaciones de labranza diferentes, utilizando ensayos de simulación de lluvia para ello.

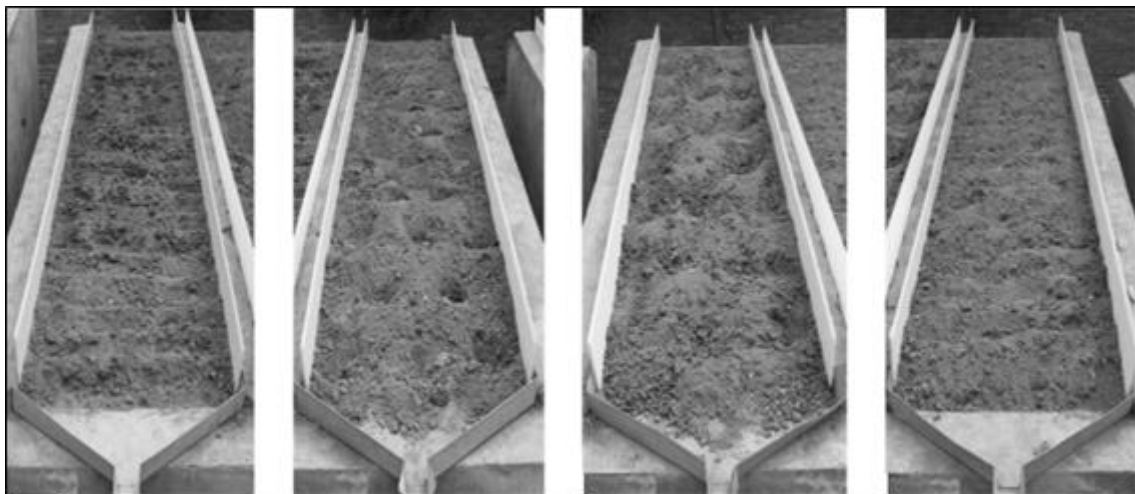


Foto 8.4: Parcelas de erosión (4 x 1 m) utilizadas por Wang et al. (2017).

Por último, los trabajos de Liu et al. (2014a y 2014 b) describen las consecuencias que supone la no efectividad del laboreo en contorno como técnica para el control de la erosión, al provocarse importantes magnitudes de pérdida de suelo cuando el agua supera la barrera física que suponen los caballones sobre el terreno. En los trabajos se incluyen referencias gráficas muy útiles para poder comprender el proceso y su magnitud (foto 8.5). Sin embargo, para profundizar en el conocimiento del proceso erosivo se realiza un importante número de simulaciones de lluvia sobre microparcels de erosión de menos de 2 m² (160 x 80 cm) labradas en contorno (foto 8.6), incidiendo de esta manera en las limitaciones anteriormente descritas.



Foto 8.5: Ejemplos de erosión por flujos concentrados sobre laderas agrícolas labradas en contorno en el Norte de China (tomadas de Liu et al., 2014a y 2014b).



Foto 8.6: Microparcels utilizada por Liu et al. (2014a, 2014 b) para evaluar la eficacia del laboreo en contorno mediante simulaciones de lluvia (Tomada de Liu et al., 2014b).

8.4.3. El laboreo en contorno y su aplicación práctica

El laboreo en contorno *sensu stricto* es una abstracción teórica, un planteamiento prácticamente de imposible aplicación en condiciones reales de campo debido a la microtopografía irregular que presentan las laderas (Griffith et al., 1990). Su aplicación siempre produce cierto grado de pendiente en el interior del surco que genera un flujo lateral. El agua que fluye por el interior de los surcos se acumula en los puntos de menor cota (Cui et al., 2007), y al superar la altura del caballón, cuando produce su rotura, da lugar a erosión por regueros y flujos concentrados (ver apartado 7.5.1.1.), especialmente intensa en campos recientemente labrados (Hill et al., 1944).

De hecho, para que el laboreo en contorno tenga su máxima eficacia, tal y como lo contempla el modelo RUSLE, debe presentar un máximo del 0.5% de pendiente a lo largo del surco. De entre las laderas caracterizadas en este trabajo, solo se produjo laboreo en contorno, aquel con pendientes en el interior del surco inferiores al 0.5%, en Hormigos 1 y 2 y Las Zorreras 1 y 2 (ver tabla 7.11). En el resto de las laderas estudiadas, allí donde se intentó labrar en contorno, la dirección de laboreo terminó por ser oblicua, llegando a presentar importantes pendientes en el interior del surco.

Mantener una pendiente máxima en el interior del surco del 0.5% permite desviarse del laboreo en contorno *sensu stricto* (ángulo de 90° entre la dirección de la máxima pendiente y la del laboreo) diferentes ángulos en función de la pendiente de la ladera. Una mayor pendiente en la ladera reducirá el ángulo de error asumible para aplicar el laboreo en contorno, o lo que es lo mismo, una mayor pendiente dificultará en mayor medida la aplicación del laboreo en contorno. En la tabla 8.6 se muestran los valores de desviación máxima en función de la intensidad de la pendiente existente en la ladera para no superar el 0.5% de pendiente en el interior del surco al aplicar el laboreo en contorno. A partir de pendientes en la ladera del 5% para considerar laboreo en contorno la desviación del ángulo de laboreo respecto a los 90° apenas podría ser de 9°, lo que supone un 10% de error, reduciéndose dicha desviación según aumenta el grado de la pendiente.

Las desviaciones máximas que se observan en la tabla 8.6, que pueden parecer asumibles a la hora de mantener un laboreo en contorno sobre el terreno, resultan muy complejas de aplicar debido a la microtopografía existente sobre las laderas que incluso, a primera vista, pudieran parecer planas. Además, una mayor pendiente sobre la ladera disminuye la desviación máxima asumible para llevar a la práctica el laboreo en contorno, lo cual resulta paradójico, ya que allí donde, debido a una a mayor pendiente, más importante podría resultar la realización del laboreo en contorno, más complejo es poder aplicarlo.

Tabla 8.6: Correspondencia entre la pendiente máxima en los surcos para considerar la dirección del laboreo en contorno (0.5%, RUSLE) y los ángulos entre la dirección del laboreo y de la máxima pendiente para diferentes pendientes medias de ladera agrícola.

Pendiente media en el surco (%)	Pendiente media en la ladera (%)	Ángulo dirección laboreo-pdte (°)	Desviación máxima (%)
0.5	4	78.75	14.3
0.5	5	81	11.1
0.5	6	82.5	9.1
0.5	7	83.6	7.7
0.5	8	84.4	6.6
0.5	9	85	5.9
0.5	10	85.5	5.3
0.5	15	87	3.4

Solo en caso de que pudiese llevarse a la práctica un laboreo en contorno *sensu stricto*, sin pendiente en el interior del surco, el potencial proceso erosivo se iniciaría por superación del volumen máximo de almacenamiento de los surcos (ver figura 7.6). En el momento en que se pone en juego un componente de flujo lateral en los surcos, el umbral de almacenamiento que representan los surcos perpendiculares a la máxima pendiente disminuye de forma notable, produciéndose, *de facto*, una mayor disminución cuanto mayor sea la pendiente en el interior del surco.

En conclusión, el laboreo en contorno *sensu stricto* es un planteamiento prácticamente de imposible aplicación en condiciones reales de campo. La aplicación de una dirección de laboreo que no produzca pendientes superiores al 0.5% en el interior del surco también resulta muy complejo de aplicar debido a la microtopografía existente sobre las laderas que incluso, a primera vista, pudieran parecer planas. Dicha complejidad en la aplicación de estas direcciones aumenta según mayor en la pendiente presente la ladera. Todo ello termina por producir, en la práctica, direcciones de laboreo oblicuas sobre las laderas agrícolas, incrementando la pendiente en el interior de los surcos y disminuyendo la efectividad del efecto barrera que representan los caballones.

8.5. Conclusiones

Todas las afirmaciones que emanan desde los modelos USLE/RUSLE respecto a las bondades de la aplicación del laboreo en contorno como técnica para el control de la erosión de los suelos son cuestionables. Esto se debe a que el diseño experimental desde el que se obtuvieron los datos que permitieron dichas afirmaciones, fundamentalmente parcelas de erosión tipo USLE, no permite comparar la eficacia de dicha técnica con el laboreo a favor de la máxima pendiente.

Este cuestionamiento se acompaña de los datos y conclusiones aportados en este trabajo y que permitieron el desarrollo de un modelo teórico de evolución de las tasas de erosión en función de la rugosidad orientada presente sobre las laderas agrícolas (ver apartado 7.5.3, figura 7.31). Dicho modelo teórico contradice la efectividad del laboreo en contorno que impulsan los modelos USLE/RUSLE y que se encuentra plenamente vigente en la actualidad.

El fenómeno de la erosión por flujos concentrados, motivo de estudio de esta Tesis, solo puede ser abordado a escala de ladera o de parcela de gran tamaño (superficie mayor de 200 m²). Las parcelas de gran tamaño, y más aún, la escala de ladera, presentan una superficie suficiente para que se puedan generar procesos de concentración lateral de flujos que puedan dar como resultado el acarcavamiento y/o reguerización de la superficie. En ambos casos, la dimensión de las superficies utilizadas otorga la posibilidad de ensayar con prácticas de cultivo y técnicas de conservación reales, únicamente aplicables a estas escalas.

A escala de ladera, al reproducirse el funcionamiento hidrológico natural sin ningún tipo de limitación, los resultados que se obtienen son más fácilmente extrapolables, con las limitaciones que pudiera producir la generalización de un resultado concreto.

La falta de efectividad del laboreo en contorno según los estudios realizados no se produce solo asociada a episodios de precipitación extremos, condiciones en las que los propios Wischmeier y Smith (1978) afirmaron que la labranza a nivel ve fuertemente reducido su grado de protección sobre el suelo, sino en todos los episodios de erosión estudiados en esta Tesis, asociados a dos escenarios de máxima intensidad erosiva: situaciones de temporal, precipitaciones de carácter ciclónico propias de las estaciones invernales, y episodios de lluvia de moderada y alta intensidad, generalmente asociados a células convectivas de desarrollo vertical.

Además, el laboreo en contorno *sensu stricto* representa un concepto teórico difícilmente aplicable en campo, lo que termina por producir en la práctica direcciones de laboreo oblicuas sobre las laderas agrícolas, incrementando la pendiente de los surcos y disminuyendo la efectividad del efecto barrera que representan los caballones.

9. CONCLUSIONES

España es el país mediterráneo europeo con tasas más elevadas de erosión actual y potencial, lo que representa, en la mayor parte del territorio español, una seria amenaza para la sostenibilidad de los agroecosistemas. En este contexto, la erosión hídrica constituye uno de los principales procesos de degradación que afecta a los suelos agrícolas en el ámbito mediterráneo y, dentro de esta, la erosión por flujos concentrados representa la mayor parte de la erosión, tanto por los valores absolutos que alcanza como por los porcentajes de erosión que supone respecto a la tasa de erosión hídrica total producida.

El problema de la erosión en campos agrícolas mediterráneos ha sido ampliamente reconocido por las diferentes administraciones, tanto a nivel europeo como nacional. Esto queda reflejado en el hecho de que, a partir de mediados de los años 90, las normativas derivadas de la Política Agraria Común (PAC) consideran como un objetivo fundamental la conservación del suelo como recurso natural, y, para ello, han ido introduciendo diferentes medidas destinadas a la lucha contra la erosión y al fomento del empleo de manejos y prácticas agrícolas que contribuyan a la conservación del suelo. Sin embargo, el desarrollo y posterior adopción de estas medidas contrasta con la falta de datos decampo que permitan su validación. Por ello, resulta fundamental ampliar la información de campo disponible sobre tasas reales de erosión y respuestas hidrológicas de las distintas prácticas agrícolas. Esta información resulta necesaria para el proceso de toma de decisiones respecto a modelos de gestión del territorio que consideren como premisa la conservación del recurso edáfico.

Para poder ampliar la información de campo disponible sobre tasas reales de erosión y respuestas hidrológicas de las distintas prácticas agrícolas, y poder abordar un mayor número de casos, se ha detectado la necesidad de implementar protocolos de campo alternativos, en ciertas circunstancias, a la aplicación del Método de la Nube de Puntos (MNP) sobre las redes dendríticas de regueros. El MNP se basa fundamentalmente en la caracterización con detalle de la totalidad de las confluencias entre canales existentes en las redes dendríticas, así como en la medición de un buen número de secciones intermedias entre confluencias. El criterio seguido para elegir la ubicación de las secciones entre confluencias es la variabilidad de la morfología del canal, de forma que, medida una sección, la siguiente medida se toma en un punto del cauce donde se aprecia un cambio morfológico importante, determinado por el observador. En ningún caso, la separación entre secciones será superior a 5 metros. Tal cantidad de información hace muy preciso el método, requiriendo, sin embargo, de una importante dedicación temporal para su aplicación, que en ocasiones resulta limitante. Por ello, utilizando como referencia el método de los transectos de control -segmentos rectilíneos paralelos que intersectan perpendicularmente la red de regueros- han sido propuestas hasta cuatro alternativas buscando conjugar eficiencia temporal y precisión: Método de los Transectos equidistantes según Distancias oblicuas (MTD), considerando Longitudes equivalentes (MTD-Le) o considerando Longitudes totales (MTD-Lt) y Método de los Transectos equidistantes según diferencias de Cota (MTC), considerando Longitudes equivalentes (MTC-Le) o considerando Longitudes totales (MTC-Lt).

A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas del estudio de la precisión y eficiencia de los diferentes protocolos alternativos propuestos para la medición en campo de la erosión por regueros y/o cárcavas efímeras:

- El Método de la Nube de Puntos siempre aporta las cuantificaciones de pérdida de suelo más precisas, que además son las menos dependientes de las características de la red estudiada. Por lo tanto, su aplicación es siempre recomendable.
- Se propone que cualquier alternativa al método MNP siempre se aplicará para redes que requieran la medida de más de 230 secciones transversales estimadas y solo se

aplicará si se produce un ahorro en el número de secciones transversales a medir igual o superior al 25%.

- Para determinar la superación o no de estos dos valores umbral, se ha desarrollado un protocolo de aplicación directa en campo que, a partir de muy pocas medidas y la resolución de dos sencillas ecuaciones (eqs. 6.7 y 6.8), permite seleccionar previamente el método más conveniente a aplicar en cada circunstancia (Método de la Nube de Puntos o métodos alternativos).
- Desde el punto de vista del análisis de los errores no se supera, en la aplicación de cualquiera de las cuatro propuestas, el 14.5% de error para equidistancias máximas entre transectos de 7 m en longitud oblicua o de 1 m en diferencia de cota, siempre y cuando no se utilice la fotogrametría “antigua” como técnica para la obtención de las longitudes totales de la red de regueros, en cuyo caso el error supera dicho umbral y llega hasta el 16.2%.
- Queda por explorar la precisión que aportaría a los métodos propuestos la fotogrametría moderna o fotogrametría automática (*Structure from Motion, SfM*), si bien es previsible que se redujesen los errores asociados a la restitución fotográfica, que resulta prácticamente automática en la actualidad con estas nuevas herramientas, y a la cartografía de los regueros, debido a la posibilidad de conjuntar un mayor número de fotografías de forma automática, aumentando de esta manera la definición de la imagen final.
- Cada uno de los métodos alternativos al de la Nube de Puntos para la cuantificación del volumen de suelo perdido propuestos en este trabajo presenta bondades en su aplicación: unos aportan una mayor precisión, mientras con la aplicación de otros se consigue un mayor ahorro temporal o la obtención simultánea a su aplicación de la cartografía de las redes de regueros, etc. No se busca una alternativa única, ni sustituir el MNP en toda circunstancia, sino poder adecuar los métodos empleados a las diferentes circunstancias y necesidades existentes, siempre conociendo los errores introducidos en el cambio.
- El desarrollo de las propuestas alternativas han llevado al desarrollo del software informático *Rill Morphometer* que ha permitido, a partir de los datos de campo obtenidos de la aplicación del Método de la Nube de Puntos, la simulación de todas las situaciones anteriormente planteadas y su comparativa; y permite, a su vez, los cálculos de pérdida de suelo a partir de los datos que se obtengan en adelante en campo, aplicando el método elegido. *Rill Morphometer* incluye también un módulo que aporta valores topográficos de referencia de las laderas estudiadas, así como características de las redes de regueros desarrolladas. La implementación de *Rill Morphometer* es una aportación original de esta Tesis.

A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas con respecto a los procesos de erosión por flujos concentrados, y con relación a la influencia de la rugosidad orientada:

- La formación de cárcavas efímeras y regueros ocurre con carácter generalizado sobre campos de cultivos extensivos del secano mediterráneo: cultivos herbáceos, viñedo y olivar; desprovistos de cubierta alguna ante precipitaciones desencadenantes de episodios erosivos extremos.
- Los resultados obtenidos en este trabajo han revelado que cerca del 70% de las tasas anuales medias de pérdida de suelo corresponden a la erosión hídrica ligada al

desarrollo de regueros y/o cárcavas efímeras que tiene lugar durante episodios erosivos que pueden ser clasificados como extremos.

- En el secano mediterráneo, estos episodios erosivos extremos, ligados al desarrollo de regueros y cárcavas efímeras, ocurren asociados a dos escenarios meteorológicos contrastados: situaciones de temporal propias de periodos invernales y tormentas aisladas de moderada y alta intensidad típicas de la estación seca. En el primero de los escenarios el encadenamiento de varios días de lluvia, normalmente de intensidad baja o moderada, da lugar a la saturación del perfil del suelo, de manera que casi cualquier precipitación es suficiente para generar altas tasas de escorrentía y erosión. En el segundo escenario, la intensidad de la lluvia, generalmente asociada a células convectivas de desarrollo vertical, supera la capacidad de infiltración instantánea de la capa superficial del suelo, transformándose, en un alto porcentaje, en escorrentía superficial.
- Los episodios con rasgos de erosión por regueros y/o cárcavas efímeras caracterizados y cuantificados en este trabajo presentan, de forma generalizada, tasas de erosión elevadas, graves en muchos de los casos. De las 48 microcuencas estudiadas, en 18 de ellas las tasas de erosión fueron superiores a los 100 Mg ha^{-1} , llegando a cuantificarse tasas de erosión superiores a los 750 Mg ha^{-1} para un único evento erosivo en la localidad de Rielves. Desde el punto de vista de la conservación del suelo, casi el 50% de los casos estudiados presentaron tasas de erosión “no tolerables”, es decir, las tasas de erosión superaron las de regeneración del suelo. Dicho porcentaje se eleva hasta el 75% de los casos de estudio si el objetivo considerado es el de la sostenibilidad a largo plazo de la productividad agrícola.
- En este contexto, el estudio de la erosión por regueros y/o cárcavas efímeras que tiene lugar durante episodios de erosión extrema en el secano mediterráneo se ha confirmado como clave a la hora de evaluar la eficacia de las distintas alternativas de prácticas agronómicas y planes de conservación del suelo, especialmente todas aquellas incluidas en la legislación derivada de la Política Agraria Común europea (PAC).
- Las respuestas hidrológicas y erosivas están fuertemente condicionadas por los patrones de laboreo, especialmente en aquellas laderas con superficies planas y menos influenciadas por los factores topográficos. Los patrones de laboreo inducen el desarrollo de dos morfologías diferentes de redes de regueros sobre las laderas: a) Redes de regueros paralelos y confinados en los surcos de labranza; b) Redes dendríticas de regueros. Las redes de regueros confinados se han desarrollado encajados a lo largo de los surcos de labranza cuando esta se ha realizado próxima a la dirección de la máxima pendiente, según los casos de estudio con desviaciones máximas de 26° entre la dirección de los surcos de labranza y la de la máxima pendiente, presentando un desarrollo muy similar en todos los casos: regueros paralelos y bajo número de capturas entre canales. Sin embargo, existe una amplia variabilidad en la complejidad de las morfologías de las redes dendríticas estudiadas. Es común a todas ellas que las direcciones de los surcos de labor se hayan desarrollado formando ángulos mínimos de 40° respecto a la máxima pendiente (direcciones de labor oblicuas), llegando a presentar direcciones de los surcos de labor *quasi* perpendiculares a la máxima pendiente (laboreo a nivel o en contorno). La complejidad de la red dendrítica, que se cuantifica en una mayor o menor densidad de drenaje, tiende a aumentar cuanto más próximo a los 90° es el ángulo y, por tanto, según se acerca a la labranza en contorno.
- Estas diferencias morfológicas en las redes de regueros tienen su reflejo en las tasas de erosión asociadas: las redes dendríticas de regueros duplican, como mínimo, las tasas

medias de erosión de las redes confinadas de regueros, siempre asociadas a un mismo evento de precipitación, llegando a superarla, en casos puntuales, en más de 25 veces. Asimismo, cuanto mayor es la complejidad de la red dendrítica, mayores son las tasas de erosión asociadas, lo cual está relacionado directamente con la existencia de un mayor ángulo entre la dirección de la labranza y la de la máxima pendiente.

Por lo tanto, la tendencia observada en la relación entre las tasas de erosión y la rugosidad orientada indica que las tasas de erosión, ocasionadas por procesos de reguerización y acarcavamiento sobre laderas agrícolas, presentan los menores valores cuando la rugosidad orientada coincide con la dirección de la máxima pendiente, aumentando de forma progresiva cuanto mayor es el ángulo entre la dirección de laboreo y la de la máxima pendiente. Según esta tendencia observada las mayores tasas de erosión se producirán en los campos labrados próximos a nivel.

- En base a los resultados obtenidos en esta investigación, la labranza en contorno se ha revelado como una práctica que no sólo no es efectiva para controlar la erosión hídrica en el secano mediterráneo, sino que intensifica dramáticamente los efectos erosivos que tienen lugar asociados a estos episodios erosivos extremos, los cuales, cabe recordar, producen la mayor parte de las tasas anuales de erosión hídrica. En consecuencia, no resulta efectiva la aplicación de la labranza en contorno como técnica para el control de la erosión hídrica en el secano mediterráneo como promulgan las diferentes normativas derivadas de la PAC.
- Este contraste, entre los resultados obtenidos en este trabajo y la efectividad atribuida al laboreo en contorno como técnica para la conservación del suelo que promulgan las diferentes normativas derivadas de la PAC y que tiene su origen fundamentalmente en los modelos USLE/RUSLE, se debe a que el diseño experimental desde el que se obtuvieron los datos para definir tal conclusión está basado fundamentalmente en parcelas de erosión tipo USLE. Las parcelas tipo USLE no permiten evaluar, por sus dimensiones limitadas, 22.13 m de longitud y 1.8 m de anchura como diseño más común aunque no único, la respuesta hidrológica y erosiva del laboreo en contorno y, por tanto, comparar su eficacia con el laboreo a favor de la máxima pendiente. Según los valores obtenidos en este trabajo, la distancia colectora media necesaria para el inicio de las incisiones en las laderas labradas en contorno u oblicuamente a la máxima pendiente es de 16.05 m; siendo el valor mínimo registrado de 1.92 m y el máximo 54.4 m. En función de estos valores, el rango de casuísticas en las cuales podría desarrollarse erosión por flujos concentrados en parcelas tipo USLE labradas en contorno es muy reducido, con lo que resulta una herramienta experimental del todo inadecuada para evaluar la eficacia de dicha práctica de conservación.
- El fenómeno de la erosión por flujos concentrados solo puede ser estudiado a escala de ladera o de parcela de gran tamaño, las cuales, por sus dimensiones, permiten que se puedan generar procesos de concentración lateral de flujos que puedan dar como resultado el acarcavamiento y/o reguerización de la superficie. Además, en ambos casos, la dimensión de las superficies otorga la posibilidad de ensayar con prácticas de cultivo y técnicas de conservación reales, únicamente aplicables a estas escalas.

10. BIBLIOGRAFÍA

- AEMET (Agencia Estatal de Meteorología) 2011. Atlas Climático Ibérico. Temperatura del aire y precipitación (1971-2000). Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. 80 páginas.
- Aguilo Bonnin, J., Camacho López, N., García Salmerón, J., López Cadenas, F., Magíster Hefner, M., Mintegui Aguirre, J., Pérez-Soba, A. 1981. Tratado del Medio Natural. Tomo I. Capítulo 4: El suelo como recurso natural. Universidad Politécnica de Madrid. CEOTMA. ICONA. INIA. 393-575.
- Ahnert, F. 1987. Approaches to dynamic equilibrium in theoretical simulations of slope development. *Earth Surface Processes and Landforms* 12 (1), 3–15
- Alatorre Cejudo, L. C. 2010. Erosión del suelo y fuentes de sedimento en la Cuenca del río Ésera (Pirineo Central). Análisis espacial y dinámica temporal mediante técnicas de simulación y teledetección. Tesis doctoral. Facultad de Filosofía y Letras. Universidad de Zaragoza.
- Alatorre, L. C. y Beguería, S. 2009. Los modelos de erosión: una revisión. *Cuaternario y Geomorfología (C & G)* 23, 29-48.
- Albadalejo, J. y Stocking, M.A. 1989. Comparative evaluation of two models in predicting storm soil loss from erosion plots in semiarid Spain. *Catena*, 16, 227-236.
- Alcázar, M. 2013. Evaluación de la erosión hídrica en parcelas experimentales en campos agrícolas de secano mediterráneo. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- Alfsen, K.H., De Franco, M.A., Glomsrød, S., Johnsen, T. 1996. The cost of soil erosion in Nicaragua. *Ecological Economics* 16 (2), 129-145.
- Almorox Alonso, J. 2007. Climatología aplicada a la ingeniería y el medio ambiente. <http://ocw.upm.es/ingenieria-agroforestal/climatologia-aplicada-a-la-ingenieria-y-medioambiente>
- Almorox Alonso, J., López Bermúdez F. y Rafaelli S. 2010. La degradación de los suelos por erosión hídrica. Métodos de estimación. Universidad de Murcia, Servicio de Publicaciones.
- Alonso-Zarza, A. M. y Calvo, J. P. 2002. En: *The Geology of Spain* (W. Gibbons y T. Moreno, Eds). The Geological Society, London, 315-320.
- Alonso Zarza, A.M., Pérez Jiménez, J.L. 2008. El terciario del NE de la Cuenca de Madrid: discordancias, abanicos aluviales, lagos y paleosuelos. *Geología de Guadalajara*. Amelia Calonge y Marta Rodríguez (editores).
- Álvaro, M.; Capote, R., Vegas, R. 1979. Un modelo de evolución geotectónica para la Cadena Celtibérica. *Acta Geol. Hispánica*, 14, 172-177
- Añó Vidal, C., Peris Mendoza, M. y Sánchez Díaz, J. 1998. BIB-ERON: base de datos bibliográfica sobre erosión hídrica del suelo. *Edafología* 7(2), 1-8.
- Apezteguía, H.P., Rampoldi, E.A., Sereno, R. 2000. Evaluación del método de Walkley y Black en suelos del centro de la provincia de Córdoba. Comisión I p. 10. *Actas del XVII Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo*, 11-14 de abril de 2000. Asociación Argentina de la Ciencia del Suelo, Mar del Plata, Argentina.
- Atlas Nacional de España. 2008. Instituto Geográfico Nacional.
- Augustinus, P.G.E.F. y Nieuwenhuyse, P.J. 1986. Soil erosion in vineyards in the Ardeche region. *Catena* 13, 295-304.

- Auzet, A.V., Boiffin, J., Papy, F., Ludwig, B., Maucorps, J., 1993. Rill erosion as a function of the characteristics of cultivated catchments in the North of France. *Catena* 20, 41–62.
- Barton, A.P., Fullen, M.A., Mitchell, D.J., Hocking, T.J., Liguang Liu, Zhi Wu Bo, Yi Zheng, Zheng Yuan Xia. 2004. Effects of soil conservation measures on erosion rates and crop productivity on subtropical Ultisols in Yunnan Province, China. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 104, 343–357.
- Batalla, R., Sala, M. y Werrity, A. 1995. Sediment budget focused in solid material transport in a subhumid Mediterranean drainage basin. *Z. Geomorph* 32(2), 249–264.
- Beguería, S. 2005. Erosión y fuentes de sedimento en la cuenca del embalse de Yesa (Pirineo Occidental): ensayo de una metodología basada en teledetección y análisis SIG. Instituto Pirenaico de Ecología, Zaragoza.
- Beguería, S., 2006. Changes in land cover and shallow landslide activity: A case study in the Spanish Pyrenees. *Geomorphology* 74(1–4), 196–206.
- Benito, G., Gutierrez, M., Sancho, C. 1993. The influence of physico-chemical properties on erosion processes in badlands areas, Ebro basin, NE-Spain. *Zeitschrift für Geomorphologie* 37/2, 199 – 214.
- Benito, G., Grodek, T., y Enzel, Y. 1998. The geomorphic and hydrologic impacts of the catastrophic failure of flood-control-dams during the 1996-Biescas flood (Central Pyrenees, Spain). *Zeitschrift für Geomorphologie*, 42, 417–437.
- Benito, M. E. 1988. Iniciación al estudio de la estructura de los suelos de Galicia. Tesis Doctoral. Facultad de Farmacia. Universidad de Santiago.
- Bennett, H.H., Chapline, W.R., 1928. *Soil Erosion a National Menace*, vol. 33. U.S. Department of Agriculture, Washington D.C.
- Bennett, S.J., Casali, J., Robinson, K.M., Kadavy, C.K. 2000. Characteristics of actively eroding ephemeral gullies in an experimental channel. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers* 43, 641–649.
- Boardman, J., Foster, I.D.L. y Dearing, J.A. 1990. *Soil Erosion on Agricultural Land*. John Wiley & Sons Ltd. Chichester.
- Boardman J., Ligneau L., De Roo A., Vandaele K. 1994. Flooding of property by runoff from agricultural land in north–western Europe. *Geomorphology* 10, 183–196.
- Boardman, J. y Poesen, J. 2006. *Soil erosion in Europe*. John Wiley & Sons, Ltd.
- Bochet, E., J. L. Rubio y J. Poesen. 1998. Relative efficiency of three representative matorral species in reducing water erosion at the microscale in a semi-arid climate (Valencia, Spain). *Geomorphology* 23, 139–150.
- Boellstorff, D., Benito, G., 2005. Impacts of set-aside policy on the risk of soil erosion in central Spain. *Agr. Ecosyst. Environ.* 107, 231–243.
- Boix-Fayós, C., Martínez-Mena, M., Arnau-Rosalén, E., Calvo-Cases, A., Castilo, V. y Albaladejo, J. 2006. Measuring soil erosion by field plots: understanding the source of variation. *Earth Sci. Rev.* 78, 267–285.

- Borst, H. L., A. G. McCall y F. G. Bell. 1945. Investigations in erosion control and the reclamation of eroded land at the Northwest Appalachian Conservation Experiment Station, Zanesville, Ohio. U.S. Dep. Agric. Tech. Bull. 888, 95 p.
- Boulaine, J. 1981. La agrología. Oikos-Tav. Barcelona.
- Bradford, J.M. y Piest R.F. 1980. Erosional development of valley-bottom gullies in the upper midwestern United States. En: D.R. Coates and J. D. Vitek (Eds.) Threshold in geomorphology. George Allen and Unwin, Londres. 75-101.
- Brandt, C. J., y J. B. Thornes. 1987. Erosional energetics. Energetics of Physical Environment-Energetic Approaches to Physical Geography, K. J. Gregory, Ed., John Wiley and Sons. 51-87.
- Browning, G.M., Parish, C.L. y Glass, J.A. 1947. A method for determining the use and limitation of rotation and conservation practices in control of soil erosion in Iowa. Journal of the American Society of Agronomy, 39, 193-214.
- Bryan, R. B. 1987. Processes and significance of rill development. En R.B. Bryan (Ed.). Rill erosion. Catena supplement nº 8, 1-16.
- Burgess, D. W. y Lemon, L. R. 1991. Characteristics of mesocyclones detected during a NEXRAD test. Preprints, 25th Int. Conf. on Radar meteorology, Paris, France, Amer. Meteor. Soc., 39-42.
- Burkam, D.E. 1966. Hydrology of Cornfield Wash area and effects of lands-treatment practices, Sandoval County, New Mexico, 1951 – 60. US Geol. Survey Water-Supply Paper 1831, 87 páginas.
- Calvo, J. P., Alonso Zarza, A. M., García del Cura, M. A. 1989. Acta Geológica Hispánica, 24, 281-298.
- Cammeraat, L.H., 2002. A review of two strongly contrasting geomorphological systems within the context of scale. Earth Surface Processes and Landforms 27, 1201-1222.
- Cammeraat, E.L.H., 2004. Scale dependent thresholds in hydrological and erosion response of a semi-arid catchment in Southeast Spain. Agriculture, Ecosystems and Environment 104, 317-332.
- Capra, A., Porto, P., Scicolone, B. 2009. Relationships between rainfall characteristics and ephemeral gully erosion in a cultivated catchment in Sicily (Italy). Soil & Tillage Research 105, 77-87.
- Carlevaris, J.J., Rodríguez, J., De la Horra, J.L., Serrano, F. 1992. La fertilidad de los principales suelos agrícolas de la zona oriental de la Provincia de Ciudad Real: La Mancha y Campo de Montiel. Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). Consejería de agricultura, Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. 294 páginas.
- Carrivick, J.L., Smith, M.W., Quincey, D.J. 2016. Structure from Motion in the Geosciences. John Wiley & Sons. 197 páginas.
- Carta Europea de los Suelos. 1972. Consejo de Europa, Estrasburgo.
- Casalí, J. 1997. Caracterización y control de la erosión por cárcavas. Tesis Doctoral. Universidad Pública de Navarra.
- Casalí, J., López, J.J., Giráldez, J.V. 1999a. Ephemeral gully erosion in Southern Navarra (Spain). Catena 36: 65-84.
- Casalí, J., Laburu, A., Lopez, J.J., Garcia, R. 1999b. Digital terrain modeling of drainage channel erosion. Journal of Agricultural Engineering Research 74, 421 – 426.

- Casalí J, Loizu J, Campo MA, De Santisteban LM, Álvarez-Mozos J. 2006. Accuracy of methods for field assessment of rill and ephemeral gully erosion. *Catena* 67: 128–138.
- Casalí, J., Giménez, R. De Santisteban, L.M., Álvarez-Mozos, J., Mena, J., Del Valle de Lersundi, J. 2009. Determination of long-term erosion rates in vineyards of Navarre (Spain) using botanical benchmarks. *Catena* 78, 12–19.
- Castillo, V.M., Gómez-Plaza, A. y Martínez Mena, M. y Albaladejo, J. 2000. Respuesta hidrológica en los medios semiáridos: las cuencas experimentales en la Sierra de Picarcho, Murcia. *Cuadernos de investigación geográfica* 26, 81 – 94.
- Ceballos, A. y Schnabel, S. 1998. Hydrological behaviour of a small catchment in the dehesa land-use system (Extremadura, SW Spain). *J. Hydrol.* 210, 146-160.
- Cerdà, A. 2001. Erosión hídrica del suelo en el Territorio Valenciano. El estado de la cuestión a través de la revisión bibliográfica. *Geoforma*. Logroño.
- Cerdà, A. 2006. Influencia de la longitud de la ladera sobre la pérdida por erosión hídrica de suelo y agua. Contribución de la estación experimental para el estudio de la erosión del suelo de El Teularet-Sierra de Enguera. En: Pérez Alberti, A. y López Bedolla, J. (Eds.) *Geomorfología y Territorio*, 177-188.
- Cerdà, A. 2008. Prólogo. En: Cerdà, A. (Ed.), *Erosión y degradación del suelo agrícola en España*. Cátedra Divulgación de la Ciencia. Universitat de València, 7-10.
- Cerdan, O., Le Bissonnais, Y., Souchère, V., Couturier, A., Bourennane, H., 2002. Rill erosion on cultivated hillslopes during two extreme rainfall events in Normandy, France. *Soil Tillage Res.* 67(1), 99-108.
- Choudhary, M.A., Guo Pei Yu, Baker, C.J. 1985. Seed placement effects on seedling establishment in direct-drilled fields. *Soil and Tillage Research* 6 (1), 79-93.
- Christensen, J.H. y Christensen, O.B. 2003. Climate modelling: Severe summertime flooding in Europe. *Nature* 421(6925), 805-806.
- Clark, E.H. 1985. The off-site costs of soil erosion. *J. Soil Water Conserv.* 40 (1), 9–22.
- Colomer Marco, J.C. y Sánchez Díaz, J. 2001. Agricultura y procesos de degradación del suelo. En: F.C. Martín de Santa Olalla (Coord.). *Agricultura y desertificación*. Páginas 109 a 132.
- Cook, K.L. 2017. An evaluation of the effectiveness of low-cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection. *Geomorphology* 278, 195–208.
- Coppus, R. e Imeson, A. 2002. Extreme events controlling erosion and sediment transport in a semiarid sub-Andean valley. *Earth Sur. Proc. Land.* 27(13), 1365-1375.
- CORINE, 1992. CORINE soil erosion risk and important land resources. Commission of the European Communities, Brussels.
- Cui, M., Cai, Q.G., Zhang, Y.G., Fan, H.M., 2007. Development of ephemeral gully during rainy season in the slope land in rolling-hill black-soil region of Northeast China. *Transactions of the CSAE* 23 (8) 59–65 (en Chino con el abstract en Inglés).
- Day, P.R. 1965. Particle fraction particle size analysis. En C.A. Black (Ed.). *Methods of soil analysis*. Amer. Soc. Agr. Madison. 545 – 567.

- De Alba, S. 1997. Metodología para el estudio de la erosión en parcelas experimentales: relaciones erosión-desertificación a escala de detalle. En: Ibáñez, J.J., Garcés Valero, B.L., Y Machado, C. (Eds.), *El paisaje Mediterráneo a través del espacio y el tiempo. Implicaciones en la desertificación*. Geoforma Ediciones. Logroño, 259-293.
- De Alba, S., 1998. Procesos de degradación del suelo por erosión en ecosistemas agrícolas en ecosistemas agrícolas de condiciones ambientales mediterráneas de la región central de España. Tesis Doctoral. Universidad Autónoma de Madrid.
- De Alba, S. 2002. Erosión hídrica en campos de agricultura extensiva. *Cuad. Soc. Esp. Cien. For.* 13, 189-190.
- De Alba S., Benito, G. y Pérez González, A. 1998. Erosión de suelo en episodios de lluvia de elevada intensidad versus episodios de moderada y baja intensidad y elevada frecuencia en ambientes semiáridos. En: Gómez Ortiz, A. y Salvador Franch, F. (Eds.), *Investigaciones recientes de la Geomorfología española*. Sociedad Española de Geomorfología, 483 – 492.
- De Alba, S., Barbero, F., Cermeño, F.I. 2008. Assessment of contour tillage as conservation practice to reduce water erosion in semiarid environments. Final COST 634 International Conference “On- and Off-site Environmental Impacts of Runoff and Erosion”. Universidad de Aveiro, Aveiro (Portugal).
- De Alba, S., Alcázar, M., Lacasta, C. y Benito, G. 2009. Water Erosion on Agricultural Lands in a Mediterranean Semiarid Climate in Central Spain. En: Faz Cano, A., Mermut, A. R., Arocena, J. M. y Ortiz, R. (Eds.) *Land Degradation and Rehabilitation. Dryland Ecosystems*. Catena Verlag, *Advances in GeoEcology*, 40: 27-36.
- De Alba Alonso, S., Alcázar Torralba, M., Cermeño Martín, F. I. y Barbero Abolafio, F. 2011. En: Meco Murillo, R., Lacasta Dutoit, R. y Moreno Valencia, M.M. (Coord.) *Agricultura ecológica en secano. Soluciones sostenibles en ambientes mediterráneos*. Ministerio de Medio Ambiente Medio Rural y Marino, Junta de Comunidades de Castilla la Mancha, Sociedad Española de Agricultura Española y Ediciones Mundi-Prensa, 13-38.
- De Bustamante, I. 1988. El subsuelo como agente depurador de vertidos líquidos contaminantes. *Informaciones y Estudios* nº49, MOPU, 74.
- De Bustamante, I.; Dorado, M.; Rojas, B.; Temiño, J.; Segura, M.; García-Hidalgo, J.F.; Pérez, P.; Valdeolmillos, A.; Sicilia, F.; Fernández, I.; López, M.J. 1995. Análisis del impacto ambiental de la explotación de los depósitos de turba asociados al río Guadiana en la Llanura Manchega e interés de su conservación. Informe Final del Proyecto Fundación Ramón Areces-Universidad de Alcalá, Alcalá de Henares, 125
- De la Horra Ruíz, J. L. 1992. Aspectos biogeográficos en relación con la problemática agraria de la comarca de Torrijos (Toledo). Facultad de Geografía e Historia. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid.
- De Ploey, J., 1989. Erosional systems: a perspectives for erosion control in European löss areas. *Soil Technol.* Ser. 1, 93–102.
- De Ploey, J. y Gabriels, D. 1980. Measuring soil loss and experimental studies. En M.J. Kirkby y R.P.C. Morgan (Eds.) *Soil erosion*. John Wiley & Sons. 63 – 108.
- De Ploey, J., Kirby, M. J., y Ahnert, F. 1991. Hillslope erosion by rainstorms: a magnitude-frequency analysis. *Earth Surf. Processes* 1, 151-161.
- De Santisteban, L.M. 2003. Análisis de factores morfológicos para la predicción de la erosión por cárcavas efímeras. Tesis Doctoral. Universidad Pública de Navarra.

- De Santisteban, L.M., Casali, J., López, J.J., 2004. Evaluation of rill and ephemeral gully erosion in cultivated areas of Navarre (Spain). Final Proceedings 3rd Int. Symposium on Gully Erosion, Oxford (Mississippi), USA.
- De Santisteban, L. M., Casali, J., López, J. J., Giráldez, J. V., Poesen, J., Nachtergaele, J. 2005. Exploring the role of topography in small channel erosion. *Earth Surf. Process. Landforms* 30, 591–599.
- De Vente, J., Poesen, J. 2005. Predicting soil erosion and sediment yield at the basin scale. Scale issues and semiquantitative models. *Earth-Science Reviews* 71, 95–125.
- Delitala, A.M., Cesari, D., Chessa, P.A., Ward, N.M. 2000. Precipitation over Sardinia (Italy) during the 1946–1993 rainy season and associated large-scale climatic variations. *International Journal of Climatology* 20, 519 – 542.
- Desmet, P.J.J. y Govers, G. 1997. Two-dimensional modelling of the within-field variation in rill and gully geometry and location related to topography. *Catena* 29, 283 – 306.
- Diez Balda, M.A. y Vegas, R. 1992. La estructura del dominio de los pliegues verticales de la Zona Centro Ibérica. J.G. Gutiérrez Marco, J. Saavedra y I. Rábano (Eds.) *Paleozoico inferior de Ibero-América*. 523-534
- Dotterweich, M. 2013. The history of human induced soil erosion: Geomorphic legacies, early descriptions and research, and the development of soil conservation- A global synopsis. *Geomorphology* 201, 1–34.
- Duchafour, P. 1987. *Manual de Edafología*. Masson. 214 páginas.
- Dunne, T., Zhang, W. y Aubry, B. 1991. Effects of rainfall vegetation, and microtopography on infiltration and runoff. *Water Resour. Res.* 27, 2271–2285.
- Durán Zuazo, V.H., Francia Martínez, J.R., Rodríguez Pleguezuelo, C. R., Martínez Raya, A., Cárceles Rodríguez, C. 2006. Soil-erosion and runoff prevention by plant covers in a mountainous area (SE Spain): implications for sustainable agriculture. *Earth Env. Sci.* 26 (4), 309 – 319.
- Eckelmann, W., Baritz, R., Bialousz, S., Bielek, P., Carré, F., Houšková, B., Jones, R.J.A., Kibblewhite, M.G., Kozak, J., Le Bas, C., Tóth, G., Tóth, T., Várallyay, G., Yli Halla, M., & Zupan, M. 2006. Common Criteria for Risk Area Identification according to Soil Threats. EUR 22185 EN. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities.
- Elías Castillo, F. y Ruiz Beltrán, L. 1981. Estudio agroclimático de la región Castilla - La Mancha. Departamento de Agricultura de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha. 247 páginas.
- Elwell, H.A. y Stocking, M.A. 1976. Vegetal cover to estimate soil erosion hazard en Rhodesia. *Geoderma*, 15, 61 – 70.
- European Environment Agency (EEA), 2003. Europe's Environment: the Third Assessment. Environmental assessment report N° 10. Copenhagen. <http://www.eea.europa.eu/publications/environmental_assessment_report_2003_10>
- European Environment Agency (EEA), 2004. Signals, 2004: A European Environment Agency update on selected issues. Copenhagen. <<http://www.eea.europa.eu/publications/signals-2004>>
- European Environment Agency (EEA), 2005. European environment. Statement and Outlook 2005. Copenhagen. <http://www.eea.europa.eu/publications/state_of_environment_report_2005_1>

- Evans, R. 1993. Extent, frequency and rates of rilling of arable land in localities in England and Wales. En S. Wicherek (Ed.) *Farm land erosion in temperate plains environment and hills*. Elsevier. 170-190.
- Evans, R. 1995. Some methods of directly assessing water erosion of cultivated lands - a comparison of measurements made on plots and in fields. *Progress in Physical Geography* 19, 115 – 129.
- Faeth, P. y Crosson, P. 1994. Building the case for sustainable agriculture. *Environment* 36(1), 16-20.
- FAO, 1977. Guía para la descripción de los perfiles del suelo. 2nd ed. Roma. 77 páginas.
- FAO, 1983. Mantengamos viva la Tierra: causas y remedios de la erosión del suelo. FAO. Roma.
- FAO, 1988. Sistemas de labranza para la conservación del suelo y del agua. FAO. Roma.
- FAO, 1989. Leyenda del Mapa Mundial de Suelos de la FAO-UNESCO (versión en castellano de: FAO, 1988. FAO-UNESCO. *Soil Map of the World: revised legend*. FAO World Soil Resources Reports n° 60. Rome). Soc. Esp. Ciencia del Suelo. Santiago de Compostela.
- FAO, 1996. El estado mundial de la agricultura y la alimentación. FAO. Roma
- FAO. 2015. Carta Mundial de los Suelos Revisada. FAO. Roma.
- FAO, PNUMA, UNESCO (1980). "Metodología provisional para la evaluación de la degradación de los suelos". FAO, Roma. 86 páginas.
- FAO. Sitio web de Agricultura de Conservación. <<http://www.fao.org/ag/ca/es/index.html>>.
- Flanagan D. 2002. *Erosion encyclopedia of soil science*. Marcel Dekker, New York. 395–398.
- Flanagan, D.C., Livingston, S.J. (Eds.), 1995. Water erosion prediction project (WEPP) version 95.7 user summary. NSERL Report No. 11, National Soil Erosion Research Laboratory, USDA-Agricultural Research Service, West Lafayette, Indiana, 139 páginas.
- Flanagan, D.C., Gilley, J.E., Franti, T.G. 2007. Water Erosion Prediction Project (WEPP): Development history, model capabilities, and future enhancements. *Trans. Am. Soc. of Agric. and Bio. Eng.*, Vol. 50, No.5, 1603-1612.
- Flint, J.J. 1974. Stream gradient as a function of order, magnitude and discharge. *Water Resources Research*, 10 (5), 969 – 973.
- Fonstad, M.A., Dietrich, J.T., Courville, B.C., Jensen, J.L., Carbonneau, P.E. 2013. Topographic structure from motion: a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surf. Process. Landf.* 38 (4), 21–430.
- Foster, G.R. 1986. Understanding ephemeral gully erosion. In: *Soil Conservation. Assessing the National Resources Inventory, 2. Committee on Conservation Needs and Opportunities. Board on Agriculture*. National Research Council. National Academy Press. Washington. 90-125.
- Foster, G.R. y Meyer, D. 1972. Transport of soil particles by shallow flow. *Transactions at the ASAE*, 15, 99 – 102.
- Foster, G. R., Johnson, C. B. y Moldenhauer, W. C. 1982. Hydraulic failure of unanchored cornstalk and wheat straw mulches for erosion control. *Trans. ASAE* 25, 940-947.

- Foster, G.R., Weesies, G.A., Renard, K.G., Yoder, D.C., McCool, D.K., Porter, J.P. 1997. Support Practice Factor (P), RUSLE Chapter 6. En: Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Handbook N°703. United States Department of Agriculture, Washington, DC.
- Fournier, F. 1972. Utilisation rationnelle et conversation du sol. *Geoforum* 3 (2), 35–47.
- Francis, C.F., y Thornes, J.B. 1990. Matorral: erosion and reclamation. En: Albaladejo, J., Stocking, M. A., Díaz, E. (Eds.), *Degradación y regeneración del suelo en condiciones Mediterráneas*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Murcia, 86 – 115.
- Franzluebbers, A. J. 2002. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil Till. Res.* 66, 95-106.
- Fullen, M.A. y Reed, A.H. 1987. Rill erosion on arable loamy sands in the west midlands of England. En R.B. Bryan (Ed.) *Rill erosion*. *Catena supplement* 8, 85 - 96.
- Gallardo Díaz, J., Ortega Martos, A. y Rodríguez Rastrero, M. 1990. Erosión en suelos agrícolas, ganaderos y forestales. En: De Alba, S., Romea, J., Orueta, D. y Mondéjar, J. (Eds.), *Hombre y Medio Ambiente*. Ayuntamiento de Alcobendas.
- Gallart, F. y Clotet, N. 1988. Some aspects of the geomorphic processes triggered by an extreme rainfall event: the november 1982 flood in Eastern Pyrenees. En A.M. Harvey y M. Sala (Eds.) *Geomorphic processes in environments with strong seasonal contrasts*. Vol. II. *Geomorphic systems*. *Catena supplement* 13, 79 – 96.
- García Nájera, J. M. 1955. El bosque, el agua y la conservación del suelo. Principios racionales de la influencia del monte en la escorrentía superficial. *Montes* 63, 203-205.
- García Ruiz, J.M. 1999. La producción científica de la geomorfología española y su impacto, a través de las publicaciones periódicas. CSIC-SEG. Zaragoza.
- García Ruiz, J.M. 2010. The effects of land uses on soil erosion in Spain: A review. *Catena* 81, 1-11.
- García Ruiz, J.M., White, M.S., Martí, C., Valero, B., Errea, M.P., Gómez Villar, A. 1997. La catástrofe del barranco de Aras (Biescas, Pirineo Aragonés) y su contexto espacio-temporal. CSIC. Instituto Pirenaico de Ecología. Zaragoza. 54 páginas.
- García Ruíz, J. M., López Bermúdez, F. y Romero Díaz, A. 2000. Geomorfología de vertientes y procesos de erosión. En: Gómez Ortiz, A. y Pérez González, A. (Eds.), *Evolución reciente de la geomorfología española*. *Servei de Gestió i Evolució del Paisatge (UB)*. Logroño, 223-252.
- García Ruiz, J.M., Arnáez, J., Beguería, S., Seger, M., Martí Bono, C., Regüés, D., Lana-Renault, N., White, S. 2005. Runoff generation in an intensively disturbed, abandoned farmland catchment, Central Spanish Pirynees. *Catena* 59, 79-92.
- García Ruiz, J.M. y López Bermúdez, F. 2009. La erosión del suelo en España. *Sociedad Española de Geomorfología*.
- Gilley, J.E. y Flanagan, D.C. 2007. Early investment in soil conservation research continues to provide dividends. *Trans. Am. Soc. of Agric. and Bio. Eng.*, Vol. 50, No. 5, 1595-1601.
- Giovannini, G., Vallejo, R., Luchessi, S., Bautista, S., Ciompi, S. y Llovet, J. 2001. Effects of land use and eventual fire on soil erodibility in dry Mediterranean conditions. *Forest Ecol. Manag.* 147, 15-23.

- Giraldez, J.V. 1998. La erosión del suelo. En: R.M. Jiménez Díaz y J. Lamo de Espinosa (Eds.) Agricultura sostenible. Agrofuturo, Life, Ediciones Mundi-Prensa, 101-117.
- Gobierno de Navarra, Servicio de Estructuras Agrarias. 2001. Estudio agroclimático de Navarra. Departamento de Agricultura, Ganadería y Alimentación. Gobierno de Navarra.
- Goldman, S. J., Jackson, J. y Bursztynsky, T. A. 1986. Erosion and sediment control handbook. John Wiley & Sons.
- González Hidalgo, J.C., De Luís Arrillaga, M., y Peña Monné, J.L. 2005. Los eventos extremos de precipitación, la variabilidad del clima y la erosión del suelo. Reflexiones ante el cambio del clima en los sistemas mediterráneos. *Revista Cuaternario y Geomorfología* 19 (1-2), 49-62.
- González-Hidalgo, J.C., Peña Monné, J.L y De Luís Arrillaga, M., 2007. A review of daily soil erosion in Western Mediterranean areas. *Catena* 71, 193 – 199.
- González-Hidalgo, J.C., de Luis, M., Batalla, R.J. 2009. Effects of the largest daily events on total soil erosion by rainwater. An analysis of the USLE database. *Earth Surf. Proc. Land.* 34, 2070-2077.
- Govers, G. 1985. Selectivity and transport capacity of thin flows in relation to rill erosion. *Catena* 12 (1), 35-49.
- Govers, G., 1987. Spatial and temporal variability in rill development processes at the Huldenberg experimental site. In: Bryan, R.B. (Ed.), *Rill Erosion, Processes and Significance*, Catena Supplement, vol. 8. Catena Verlag, Cremlingen, 17– 34.
- Govers, G. 1991. Rill erosion on arable land in central Belgium: rates, controls and predictability. *Catena*. 18, 133-155.
- Govers, G. y Poesen, J. 1988. Assessment of the interrill and rill contributions to total soil loss from an upland field plot. *Geomorphology* 1, 343 – 354.
- Gregorich, E.G. y Carter, M.R. 1997. Soil quality for crop production and ecosystem health. Elsevier. Amsterdam.
- Griffith, D.R., Parsons, S.D., Mannering, J.V., 1990. Mechanics and adaptability of ridge-planting for corn and soya bean. *Soil and Tillage Research* 18 (2–3) 113– 126.
- Grissinger, E.H. y Murphey, J.B. 1989. Ephemeral gully erosion in the loess uplands, Goodwin Creek Watershed Northern Mississippi, USA. En: *Proceedings of the Fourth International Symposium of River Sedimentation*, Beijin, China. 51-58.
- Guerra Delgado, A. 1968. Mapa de suelos de España a escala 1:1.000.000. Instituto Nacional de Edafología y Agrobiología “Jose María Alvareda”, Consejo Superior de Investigaciones Científicas. Madrid.
- Gunatilake, H.M.; Vieth, G.R. 2000. Estimation of on-site cost of soil erosion: a comparison of replacement and productivity change methods. *Journal of Soil and Water Conservation* 55, 197-204.
- Gutiérrez, F., Gutierrez, M., Sancho, C. 1998a. Geomorphological and sedimentological of a catastrophic flash flood in the Arás drainage basin (Central Pyrenees, Spain). *Geomorphology* 22, 265-284.
- Gutiérrez, M., Gutierrez, F., Sancho, C. 1998b. La avenida del 7 de agosto de 1996 en la cuenca y abanico aluvial de Arás (Valle de Tena, Pirineos Centrales). Aspectos geomorfológicos y sedimentológicos. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 11, 71 – 86.

- Hansen, L.T., Breneman, V.E., Davidson, C.W., Dicken, C.W. 2002. The cost of soil erosion to downstream navigation. *Journal of Soil and Water Conservation*, 57 (4) 205-212.
- Hatfield, J.L., Allmaras, R.R., Rehm, G.W., Lowery, B. 1998. Ridge tillage for corn and soybean production: environmental quality impacts. *Soil and Tillage Research*, 48 (3), 145-154.
- Hill, H.O., Peevy, W.J., McCall, A.G. Bell, y F.G. 1944. Investigations in erosion control and the reclamation of eroded land at the Blackland Conservation Experiment Station, Temple, Texas, 1931-41. Tech. Bull. No. 859. Washington, D.C.: USDA.
- Hillel, D. 1998. *Environmental Soil Physics*. Academic Press. San Diego.
- Horton, R.E. 1945. Erosional development of streams and their drainage basin; hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. of Am. Bulletin*, 56, 275-370.
- Hudson, N. W. 1971. *Soil Conservation*. Cornell Univ. Press. Ithaca.
- Hudson, N. W. 1973. *Soil Conservation*. Bt Batsford Ltd. London.
- Hudson, N. W. 1993. Field measurement of soil erosion and runoff. *FAO Soils Bulletin* n° 68.
- ICONA, 1982. Mapa de fenómenos de erosión hídrica en España, escala 1:1.000.000. D.G. de Medio Ambiente, Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- ICONA, 1988. Agresividad de la lluvia en España. Valores del factor R de la Ecuación Universal de Pérdida de Suelo. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid. IGME (Instituto Geológico y Minero de España), 2007. Mapa Geológico de España Escala 1:50.000.
- IGME (Instituto Geológico y Minero de España), 1971. Mapa Geológico de España Escala 1:200.000. Hoja n° 45. IGME. Madrid.
- IGME (Instituto Geológico y Minero de España), 2007. Mapa Geológico de España Escala 1:50.000. Hoja n° 581, Móstoles. IGME. Madrid.
- IGME (Instituto Geológico y Minero de España), 2007. Mapa Geológico de España Escala 1:50.000. Hoja n° 628, Torrijos. IGME. Madrid.
- IGME (Instituto Geológico y Minero de España), 2007. Mapa Geológico de España Escala 1:50.000. Hoja n° 737, Villarrubia de los Ojos. IGME. Madrid.
- INE (Instituto Nacional de Estadística). 2009. Censo Agrario. <<http://www.ine.es/jaxi/menu.do?jsessionid=D53A46C6BF7247EF903C5641B32F6882.jaxi02?type=pcaxis&path=%2Ft01%2Fp042/E01&file=inebase&L=0>>
- IPCC (Intergovernmental Panel of Climate Change). 2007 y 2008. Fourth Assessment Report (AR4) "Climate change 2007)". <<http://www.ipcc.ch/>>
- James M.R. y Robson S. 2014. Mitigating systematic error in topographic models derived from UAV and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms* 39, 1413-1420.
- Jamison, V.C., Smith, D.D., Thornton, J.F. 1968. Soil and water research on a claypan soil. *US Dep. Agric. Tech. Bull.* 1379.
- Jasa, P.J., Dickey, E.C., Shelton, D.P. 1986. Soil erosion from tillage and planting systems used in soybean residue: Part II –Influences of row direction. *TRANSACTIONS of the ASAE*, 29, 761-766.

- Jerez Garcia, O. 2008. Villarrubia de los Ojos del Guadiana. Excmo. Ayuntamiento de Villarrubia de los Ojos. <http://www.villarrubiadelosojos.es/laciudad/geografia_villarrubiadelosojos_1.0.pdf>
- Jerez Garcia, O. 2009. Villarrubia de los Ojos de Guadiana. Geografía, paisaje y medio ambiente. CERSA, Ministerio de Medio Ambiente y Vicerrectorado de Investigación, UCLM. 520
- Julivert, M., Fontbote, J.M., Ribeiro, A., Conde, L.E. 1972. Mapa tectónico de la Península Ibérica y Baleares, escala 1:1.000.000. Memoria explicativa. IGME. 113 páginas.
- Junco, F., Calvo, J.P. 1983. Cuenca de Madrid. En Geología de España Libro Jubilar J.M. Ríos. Vol 2. IGME. 534-543.
- Kinnell, P.I.A. 2005. Raindrop-impact-induced erosion processes and prediction: A review. Hydrological Processes 19 (14), 2815–2844.
- Knisel, W. G. 1980. CREAMS: A field-scale model for chemicals runoff and erosion from agricultural management systems. Conservation Research Report 26. Washington D.C. USDA-Sci. And Educ. Admin.
- Kosmas, C., Danalatos, N., Cammeraat, L.H., Chabart, M., Diamantopoulus, J., Farand., R., Gutierrez, L., Jacob, A., Marques, H., Martínez-Fernández, J., Mizara, A., Moustakas, N., Nicolau, J.M., Oliveros, C., Pinna, G., Puddu, R., Puigdefábregas, J., Roxo, M., Simao, A., Stamou, G., Tomasi, N., Usai, D. y Vacca, A. 1997. The effect of land use on runoff and soil erosion rates under Mediterranean conditions. Catena 29, 45-59.
- Laflen, J.M. 1985. Effect of tillage systems on concentrated flow erosion. En I. Pla Sentis (Ed.) Soil conservation and productivity. Sociedad Venezolana de la Ciencia del Suelo. 798 – 809.
- Laflen, J.M. y Moldenhauer, W.C. 2003, Pioneering Soil Erosion Prediction- The USLE Story. World Association of Soil and Water Conservation, Special Publication #1.
- Laflen, J.M., Flanagan, D.C. 2013. The development of US soil erosion prediction and modeling. International Soil and Water Conservation Research. 1 (2), 1–11.
- Lal, R. 1990. Soil erosion in the Tropics. McGraw Hill, Inc.
- Lal, R. 1994. Water management in various crop production systems related to soil tillage. Soil Till. Res. 30, 169-185.
- Lal, R. 1995. Global soil erosion by water and carbon dynamics. En: R. Lal, J. Kimble, E. Levine y B.A. Stewart (Eds.) Soil Management and Greenhouse Effect. Lewis Pub., Boca Raton, FL.
- Lampurlanés J., P. Angás, C. Cantero-Martínez. 2002. Tillage effects on water storage during fallow, and on barley root growth and yield in two contrasting soils of the semi-arid Segarra region Spain. Soil. Till. Res. 65, 207-220.
- Land Care In Desertification Affected Areas From Science Towards Application (LUCINDA)” 2008. Comisión Europea de Agricultura y Desarrollo Rural. <<http://geografia.fcsh.unl.pt/lucinda/default.html>>.
- Larson, W. E. y Pierce, F. J. 1994. The dynamics of soil quality as a measure of sustainable management. En: Doran, J. W., Bezedick, D. C., Bezedic, D. F. y Stewart, D. A. (Eds.) Defining soil quality for a sustainable environment. Soil Sci. Soc. Special Pub. 35. Madison, W.I.
- Lasanta Martínez, T 2003. Gestión agrícola y erosión del suelo en la cuenca del Ebro: el estado de la cuestión. Zubía 21, 71-96.

- Le Bissonnais, Y., Montier, C., Jamagne, M., Daroussin, J., King, D. 2002. Mapping erosion risk for cultivated soil in France *Catena*, 46 (2-3), 207-220.
- Lecarpentier, C., 1975. L'évapotranspiration potentielle et ses implications géographiques. *Annales de Géographie* 464 (84), 385 – 414.
- Lee, C.R. y Skogerboe, J.G. 1985. Quantification of erosion control by vegetation on problem soils. En: Swaify, W.C., Moldenhauer, W.C. y Lo, A. (Eds.), *Soil erosion and Conservation*. Soil Conservation Society of America, 437 – 444.
- Lentz, R.D., Dowdy, R.H., Rust, R.H. 1993. Soil property patterns and topographic parameters associated with ephemeral gully erosion. *Journal of Soil and Water Conservation* 48, 354-361.
- Leser, H., Meier-Zielinski, S., Prasuhn, V., Seiberth, C., 2002. Soil erosion in catchment areas of Northwestern Switzerland. Methodological conclusions from a 25-year research programme. *Zeitschrift für Geomorphologie* 46, 35–60.
- Lewis, R.P.W. 1992. Flooding at Carmarthen in October 1987: Historical Precedents and Statistical Methods. *Weather*, 47, 82-89
- Liu, Q., Shi, Z., Yu, X., Zhang, H., 2014a. Influence of microtopography, ridge geometry and rainfall intensity on soil erosion induced by contouring failure. *Soil Tillage Res.* 136, 1–8.
- Liu, Q., Zhang, H., An, J. Wu, Y.Z. 2014b. Soil erosion processes on row sideslopes within contour ridging systems. *Catena* 115, 11–18.
- Llorens, P. y Gallart, F. 1992. Small basin response in a Mediterranean abandoned farming area: research designs and preliminary results. *Catena* 19, 309-320.
- Loomis, R.S. y Connor, D.J. 1992. *Crop ecology*. Cambridge University Press. Nueva York.
- López Bellido, L. 2002. Jornada temática Aspectos Medioambientales de la agricultura. Madrid.
- López Bermúdez, F. 1992. LA erosión del suelo, un riesgo permanente de desertificación. *Ecosistemas* 3, 10-13.
- López Bermúdez, F., García-Ruiz, J. M., Romero-Díaz, A. Ruiz Flaño, P., Martínez-Fernández, J., Lasanta T. 1993. Medidas de flujo de agua y sedimentos en parcelas experimentales. Cuadernos Técnicos de la SEG. Geoforma Ediciones. Logroño.
- López Bermúdez, F. y García Ruiz, J. M. 2008. La degradación del suelo por erosión hídrica en España. En: Cerdá, A. (Ed.), *Erosión y degradación del suelo agrícola en España*. Cátedra de Divulgación de la Ciencia, Universitat de València, 11-50.
- López Cadenas, F. y Blanco Criado, M. 1968. *Hidrología forestal*. E. T. S. de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- López Vicente, M. 2007. Erosión y redistribución del suelo en agroecosistemas mediterráneos: Modelización predictiva mediante SIG y validación con ¹³⁷Cs (Cuenca de Estaña, Pirineo Central). Facultad de Ciencias. Facultad de Ciencias. Universidad de Zaragoza.
- Loughran, R.J. 1989. The measurement of soil erosion. *Progress in Physical Geography*, 13: 216-233.
- Ludwig, B. 1992. Érosion par ruissellement concentré des terres cultivées du nord du Bassin parisien. Thèse de doctorat. Université Strasbourg. France.

- Ludwig, B., Boiffin, J., Chadoeuf, J., Auzet, A.V., 1995. Hydrological structure and erosion damage caused by concentrated flow in cultivated catchments. *Catena* 25, 227–252.
- Magíster, M. 1973. Apuntes de conservación de suelos. E. T. S. de Ingenieros Agrónomos. Universidad Politécnica de Madrid. Madrid.
- MAGRAMA 2010. Mapa de Cultivos y Aprovechamientos 2000-2010. Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente. <<http://sig.magrama.es/siga/>>
- MANERO (Manejo y Erosión). 2008. Memoria Técnica del Informe Final del Proyecto MANERO. Plan Nacional de I+D+I 2004-07 (Ref: AGL2004-00650, MEC).
- Mannaerts, C., 1992. Assessment of the Transferability of Laboratory Rainfall–Runoff and Rainfall–Soil Loss Relationships to Field and Catchment Scales. ITC publication, vol. 19. Enschede, The Netherlands. 202
- MAPA. 1994. Métodos Oficiales de Análisis. Tomo III. Ministerio de Agricultura, Pesca y Alimentación. Madrid.
- Mapa de asociaciones de suelo (sistemática FAO) de la Comunidad de Madrid. 2001. FIDA. Centro de investigaciones ambientales “F. González Bernáldez”. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Comunidad de Madrid.
- Mapa Agrológico: Capacidad Agrológica de las tierras de la Comunidad de Madrid, escala 1:50.000. 2005. Dirección General de Urbanismo y Planificación Regional. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio. Comunidad de Madrid.
- MARM 2005. Guía de la Condicionalidad de la PAC Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino. Madrid.
- Marqués, M.J. 1991. Soil erosion research: experimental plots on agricultural and burnt environments near Barcelona. En: M. Sala, J.L. Rubio y J.M. García-Ruiz (Eds.), *Soil Erosion Studies in Spain*. Geoforma Ediciones, Logroño, 153-164.
- Martín Bono, C. y Puigdefábregas, J. 1983. Consecuencias geomorfológicas de las lluvias de noviembre de 1982 en las cabeceras de algunos valles pirenaicos. *Estudios Geograficos*, 170-171: 275-290.
- Martin De Santa Olalla, F. 2001. Agricultura y Desertificación. Departamento de Producción Vegetal y Tecnología Agraria. Universidad De Castilla-La Mancha. Instituto de Desarrollo Regional. Ediciones Mundi-Prensa. 341
- Martín Escorza, C. y Hernández Enrille, J. L. 1972. Contribución al conocimiento de la geología del Terciario occidental de la Fosa del Tajo. *Bol. R. Soc. Hist. Nat. (Geol.)* 70, 171-190.
- Martin Fernández y Martínez Núñez, 2011. An empirical approach to estimate soil erosion risk in Spain. *Science of the Total Environment* 409 3114–3123.
- Martin, P., Papy, F., Souchère, V. y Capillon, A. 1998. Maitrise du ruissellement et modélisation des pratiques de production. *Cahiers Agricultures* 7(2), 111-119.
- Martínez-Casasnovas, J.A. y Sánchez Bosch, I. 2000. Impact assessment of changes in land use/conservation practices of soil erosion in the Penedès-Anoia vineyard region (NE Spain). *Soil & Tillage Research* 57, 101-106.

- Martínez-Casasnovas, J. A., Ramos, JM. C. y Ribes-Dasi, M. 2002. Soil erosion caused by extreme rainfall events: mapping and quantification in agricultural plots from very detailed digital elevation models. *Geoderma* 105, 125-140.
- Martínez Casasnovas, J.A., Ramos, M.C., Ribes-Dasi, M. 2005. On site effects of concentrated flow erosion in vineyard fields: some economic implications. *Catena* 60, 129-146.
- Mateo Box, J.M. 1995. Manual de prácticas y actuaciones agroambientales. Ediciones Mundi-Prensa. 310 páginas.
- McCormack, D.E., Young, K.K. y Kimberlin, L. W. 1982. Current Criteria for Determining soil loss tolerance. En: Schmidt, R. R., Allmaras, J. V., Mannering, J. V. y Papendick, R. I. (Eds.), *Determinants of soil loss tolerance*. ASA Publication N° 45. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America.
- Merkel, L.D., Woodward, D.E., Clarke, C.D. 1989. Method to predict cropland ephemeral gully erosion. *Proceedings of the International Symposium of Sediment Transport Modelling*. ASAE. St Joseph, 361
- Merritt, W. S., Letcher, R. A. y Jakeman, A. J. 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling and Software* 18, 761-799.
- Meyer, L.D. 1984. Evolution of the Universal Soil Loss Equation. *J. Soil and Water Conservation*, 39 (2), 99-104.
- Meyer, L.D. y Moldenhauer, W.C. 1985. Soil erosion by water: The research experience. *Agric. Hist.* 59, 192-204.
- Millennium Ecosystem Assessment. 2005. *Ecosystems and Human Well-being: Synthesis*. Island Press, Washington, DC.
- Miller, M.F. 1946. Early Measurements of Runoff and Erosion. U. S. Dept. Agr. Soil Conservation, Vol. 11, No. 11, 255-257.
- Moldenhauer, W.C. y Wischmeier, W.H. 1960. Soil and water losses and infiltration rates on Ida silt loam as influenced by cropping system, tillage practices and rainfall characteristics. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 24, 409-413.
- Molinillo, M., Lasanta, T y García-Ruíz, J.M. 1997. Managing montanious degraded landscapes after farmland abandonment in the Central Spain Pyrenees. *Env. Manag.* 21, 587 – 598.
- Monturiol Rodríguez, F., Alcalá Del Olmo Bobadilla, L. 1990. Mapa de asociaciones de suelos de la Comunidad de Madrid. Escala 1:200.000. Consejería de Agricultura y Cooperación. Instituto de Edafología y Biología vegetal del CSIC.
- MOPT 1991. Medio Ambiente en España. 1990. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Madrid.
- MOPT. 1992. Medio Ambiente en España 1991. Ministerio de Obras Públicas y Transportes. Madrid.
- Moreira, J. M. 1991. Capacidad de uso y erosión de suelos. Agencia de Medio Ambiente de la Junta de Andalucía. Sevilla.
- Morgan, R.P.C. 1986. *Soil erosion & Conservation*. Pongan. 298 páginas.
- Munsell. 1975. Munsell soil color charts. Kollmorgen corporation. Maryland.

- Mutchler C. K., Murphree, C. E. y McGregor, K. C. 1988. Laboratory and field plots for soil erosion studies. En: Lal, R. (Ed.) Soil erosion research methods. Soil and Water Conservation Society, 9-38.
- Mutreja, K.N. 1990. Applied hidrogeology. Tata McGraw- Hill Publishing Company Limited. New Delhi. 959
- Nachtergaele, J., Poesen, J., Vandekerckhove, L., Oostwoud Wijdenes, D., Roxo, M., 2001b. Testing the ephemeral gully erosion model (EGEM) for two Mediterranean environments. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 17–30.
- Navas, A. 1995. Cuantificación de la erosión mediante el radioisótopo Ce^{137} . Cuadernos Técnicos de la SEG. Geoforma Ediciones. Logroño.
- Nelson, D.W. y Sommers, L.E. 1996. Total carbon, organic carbon, and organic matter. En: A.L. Page et al. (Ed.). *Methods of Soil Analysis, Part 2*, 2nd ed. Agronomy. 9:961-1010. Am. Soc. of Agron., Inc. Madison, WI.
- Oliver Moscardó, S., González Ponce, R. y Lacasta Dutoit, C. 1985. Caracterización climática de la Finca Experimental La Higuera. En: Blanco de Pablos, A. (Ed.) *Avances sobre la investigación en bioclimatología*. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 87-95.
- Osborn, H.B. y Simanton, J.B. 1989. Gullies and sediment yield. *Rangelands* 11, 51-56.
- Osterkamp, W.R., Toy, T.J., 1997. Geomorphic considerations for erosion prediction. *Environmental Geology* 29, 152–157.
- Page, A.L., Miller, R.H., Keeney, D.R., 1982. *Methods of soil analysis, part 2. Chemical and microbiological properties*. Amer. Soc. of Agron, Madison, Wisconsin, USA.
- Pérez Cueva, A.J. y Calvo, A. 1984. Lluvias torrenciales y cambios geomórficos en una pequeña cuenca de montaña: el barranco de la Cuesta de la Vega (Valencia). *Cuadernos de investigación geográfica*, ISSN 0211-6820, N° 10, 1984, págs. 169-182
- Pérez Urruti, J.A. 1948. *Trabajos hidrológicos-forestales: fijación de terrenos*. Primer Centenario de la Fundación de la Escuela Especial y del Cuerpo de Ingenieros de Montes. División hidrológico-forestal del Segura. Madrid.
- Perkins Marsh, G. 1864. *Man and Nature: or, physical geography as modified by human action*. C. Scribner. 560 páginas
- Pimentel, D. 2006. Soil erosion: a food and environmental threat. *Environment, Development and Sustainability* 8, 119-137.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Sphpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R. y Blair, R. 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science* 267, 1117-1123.
- Poesen, J. 1993. Gully typology and gully control measures in the European loess belt. En S. Wicherek (Ed.) *Farm land erosion in temperate plains environment and hills*. Elsevier. 221-239.
- Poesen, J. y Govers, G. 1990. Gully erosion in the Loam Belt of Belgium: typology and control measures. En J. Boardman, I.D.L. Foster y J.A. Dearing (Eds.). *Soil erosion on agricultural land*. John Wiley & Sons. Londres, 513-530.

- Poesen, J., Ingelmo-Sanchez, F., Mucher, H. 1990. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15 (7), 653-671.
- Poesen, J. y Hooke, J.M. 1997 Erosion, flooding and channel management in Mediterranean environments of southern Europe. *Prog. Phys. Geog.* 21, 157–199.
- Poesen, J., Wesemael B., Govers, G., Martínez-Fernandez, J., Desmet. P., Vandaele, K. Quine, T., Degraer, G. 1997. Patterns of rock fragment cover generated by tillage erosion. *Geomorphology* 18 (3-4), 183-197.
- Porta, J., López-Acevedo, M. y Roquero, C. 2003. *Edafología para la agricultura y el medio ambiente*. 3ª edición. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid.
- PRUDENCE -Prediction of Regional Scenarios and Uncertainties for Defining European Climate Change Risks and Effects (2007). European Climate Project. European Commission. <<http://prudence.dmi.dk>>
- Queried, J. 1994. ¿Hacia un cambio climático? Publicaciones de la Universitat Jaume I, Castelló. Castellon de la Plana (España). 27 páginas.
- Quinton, J.N. y Catt, J.A. 2004. The effects of minimal tillage and contour cultivation on surface runoff, soil loss and crop yield in the long-term Woburn Erosion Reference Experiment on sandy soil at Woburn, England. *Soil Use and Management* 20, 343 – 349.
- Quiquerez, A., Brenot, J., Garcia, J.P., Petit, C. 2008. Soil degradation caused by a high-intensity rainfall event: Implications for medium-term soil sustainability in Burgundian vineyards. *Catena*, 73 (1), 89-97.
- Quirantes Calvo, J. A. 2008. *Nociones básicas sobre Supercélulas*. INM-AEMET. Madrid.
- Ramos, M.C. y Martínez-Casasnovas, J.A., 2004. Nutrient losses from a vineyard soil in Northeastern Spain caused by an extraordinary rainfall event. *Catena* 55, 79– 90.
- Ramos, M.C. y Martínez-Casasnovas, J.A. 2006. Impact of land levelling on soil moisture and runoff variability in vineyards under different rainfall distributions in a Mediterranean climate and its influence on crop productivity. *Journal of Hydrology* 321, 131-146.
- Rauws, G. 1987. The initiation of rills on plane beds of non-cohesive sediments. En R.B. Bryan (ED.) *Rill Erosion. Soil & Tillage Research* 13, 75-81.
- Rauws, G. y Govers, G. 1988. Hydraulic and soil mechanical aspects of rill generation on agricultural soils. *Journal of Soil Science* 39, 111-124.
- Rawls, W.J., Onstad, C.A., Richardson, H.H. 1980. Residue and tillage effects on SCS runoff curve numbers. *Transactions of the ASAE*, 23, 357-361.
- Renard, K.G., Foster, G.R., 1983. *Soil Conservation: Principles of erosion by water*. En: H.E. Dregne y W.O. Willis (Eds.) *Dryland Agriculture*. American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, 155–176.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., Porter, J.P., 1991. RUSLE – Revised universal soil loss equation. *J. Soil Water Conserv.* 46 (1), 30–33.
- Renard, K.G., Foster, G.R., Yoder, D.C., y McCool, D.K. 1994. RUSLE revisited: Status, questions, answers, and the future. *J. Soil Water Conserv.* 49, 213-220.

- Renard, K.G., Foster, G.R., Weesies, G.A., McCool, D.K., Yoder, D.C., 1997. Predicting soil erosion by water: a guide to conservation planning with the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE). Handbook N°703. United States Department of Agriculture, Washington, DC.
- Renard, K.G., Yoder, D.C., Lightle, D.T., Dabney, S.M. 2011. Universal soil loss equation and revised universal soil loss equation. R.P.C. Morgan, M.A. Nearing (Eds.), Handbook of Erosion Modelling. Chichester (2011), 135–167
- Riba, O. 1957. Terrasses du Manzanares et du Jarama aux environs de Madrid. Livret guide de l'excursion C₂, 5° Congr. Intern. I.N.Q.U.A., Madrid.
- Risse, L.M., Nearing, M.A., Nicks, A.D., Laflen, J.L. 1993. Error assessment in the Universal Soil Loss Equation. SOIL SCI. SOC. AM. J. 57. 825-833.
- Rivas Martínez, S. 1987. Memoria del Mapa de las series de vegetación de España a escala 1:400.000. ICONA. Madrid.
- Rivas-Martínez, S.; Peinado Lorca, M. 1987. La vegetación de España. Universidad de Alcalá de Henares. 544 páginas.
- Robinson, G.W. 1922. A new method for the mechanical analysis of soils and other dispersions. Journal of Agriculture Science 12, 306-321.
- Rodríguez Martínez-Conde, R., Puga Rodríguez, J.M., Vila García, R., Cibeira Friol, A. 1996. La erosión en campos cultivados en Galicia (NW España). Cadernos do Laboratorio Xeolóxico de Laxe: Revista de xeoloxía galega e do hercínico peninsular, N° 21, (Ejemplar dedicado a: IV Reunión Nacional de Geomorfología), págs. 147-162
- Rojo-Serrano, L. y Sánchez Fuster, M. 1997. Red de Estaciones Experimentales de Seguimiento y Evaluación de la Erosión y Desertificación (RESEL). Catálogo de Estaciones 1996. Dirección General de Conservación de la Naturaleza. MMA.
- Romero Díaz, A. 2002. La erosión en la Región de Murcia. Universidad de Murcia, Servicio de Publicaciones.
- Romero, R., Guijarro, J.A., Ramis, C., Alonso, S. 1998. A 30-year (1964-1993) daily rainfall data base for the Spanish Mediterranean regions: First exploratory study. International Journal of Climatology 18, 541 – 560.
- Romero, R., Ramis, C., Guijarro, J.A. 1999. Daily rainfall patterns in the Spanish Mediterranean area: an objective classification. International Journal of Climatology 19, 95 – 112
- Roose, E. 1996. Land husbandry: strategy and component. FAO. Soils Bull., Rome, N° 70, 380 páginas.
- Roquero de Laburu, C. 1954. La conservación del suelo, problema nacional. Ministerio de Agricultura. Madrid.
- Roquero de Laburu, C. 1964. Estudio sobre la conservación y mejora del suelo en España. Anales del INIA 13, 1-477.
- Rosselló, V.M. 1993. Sedimentos, ambiente, hombre. En M.P. Fumanal y J. Bernabeu (Eds.) Estudios sobre Cuaternario. Medios sedimentarios, cambios ambientales, habitat humano, 7-14. Conferencia inaugural de la VIII Reunión Nacional sobre Cuaternario.
- Roxo, M. J. 1994. A acoso antrópica no proceso de degradação de solos. A Serra de Serpa e Mértola. PhD Thesis. Universidade Nova de Lisboa.

- Rubio, J.L., Andreu, V. y Cerni, R. 1990. Degradación del suelo por erosión hídrica: diseño experimental y datos preliminares. En: Albaladejo, J., Stocking, M.A. y Díaz, E. (Eds.), Degradación y regeneración del suelo en condiciones ambientales mediterráneas. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, 215 – 235.
- Sancho Comíns, J., Moreno Sanz, F., Navalpotro, P. y Santaolaya, A. 1994. El medio Ambiente en la PAC: impactos recientes en la agricultura española. *El Campo* 131, 9-38.
- Sancho, C., Benito, G. y Gutiérrez-Elorza, M. 1991. Agujas de erosión y perfiladores microtopográficos. Cuadernos Técnicos de la SEG. Geoforma Ediciones. Logroño.
- Sanz Montero, M. E., Avedaño, C., Cogo, R. y Gómez, J. L. 1998. Determinación de la erosión en la cuenca del Segura a partir de los sedimentos acumulados en sus embalses. *Geogaceta* 23, 135-138.
- Sauer, T. y Ries, J. B. 2008. Vegetation cover and geomorphodynamics on abandoned fields in the Central Ebro Basin (Spain). *Geomorphology* 102 (2), 267-277.
- Savat, J. y De Ploey, J. 1982. Sheetwash and rill development by Surface flow. En: R.B. Bryan y A. Yair (Eds.) *Badland geomorphology and piping*. Geo Books. Norwich. 113-126.
- Schertz, D.L. 1983. The basis for soil loss tolerances. *J. Soil Water Conserv.* 38 (1), 10–14.
- Schmidt, B. L., Allmaras, R. R., Mannering, J. V. y Papendick, R. I. 1982. Determinants of soil loss tolerance. American Society of Agronomy-Soil Science Society of America. Madison. 153 páginas.
- Schumm, S.A. 1956. Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy. *Bulletin of the Geological Society of America* 67, 579-646.
- Schumm, S.A. 1980. Some applications of the concept of geomorphic thresholds. En: (D.A. Coates y J.D. Vitek (Eds.). *Thresholds in Geomorphology*. Allen & Unwin, London, 472-485.
- SCS. 1973. US Department of Agriculture Soil Conservation Service, Advisory notice, Soils-6. U.S. Government Printing Office, Washington DC.
- Shi, Z.H., Cai, C.F., Ding, S.W., Wang, T.W., Chow, T.L. 2004. Soil conservation planning at the small watershed level using RUSLE with GIS: a case study in the Three Gorge Area of China. *Catena* 55, 33–48.
- Sibbesen E. 1995. Phosphorus, nitrogen and carbon in particle-size fractions of soils and sediments. In: Correl, A. (Ed.) *Surface runoff, erosion and loss of phosphorus at two agricultural soils in Denmark, plot studies 1989–1992*, SP-report 11, 135–148.
- Smith, D. D. 1941. Interpretation of soil conservation data for field use. *Agric. Eng.* 22 (5), 173-175.
- Smith, D.D., Whitt, D.M., Zingg, A. W., McCall, A.G., Bell, F. G. 1945. Investigations in erosion control and reclamation of eroded Shelby and related soils at the Conservation Experiment Station, Bethany, Missouri, 1932-42. Tech. Bull. No. 883. Washington, D.C.: USDA.
- Smith, D.D., Whitt, D.M. 1947. Estimating soil losses from field areas of claypan soil. *Soil Sci. Soc. Am.* 12, 485-490.
- Smith, D.D., Whitt, D.M. 1948. Evaluating soil losses from field areas. *Agric. Eng.* 29, 394-396.
- Smith, L.M., 1993. Investigation of Ephemeral Gullies in Loessial Soils in Mississippi. U. S. Army Corps of Engineers. Technical Report GL-93-11. Vicksburg.

- Smith, M., Vericat, D., 2015. From experimental plots to experimental landscapes: topography, erosion and deposition in sub-humid badlands from structure-from-motion photogrammetry. *Earth Surf. Process. Landf.* 40:1656–1671.
- Smith, R.M. y Stamey, W.L. 1965. Determining the range of tolerable erosion. *Soil Sci.* 100, 414- 424.
- Snavely, N., Seitz, S. M., Szeliski, R. 2006. Photo tourism: exploring photo collections in 3D. *ACM Transactions on Graphics*, 25 (3), 835–846.
- SOCO (Sustainable Agriculture and Soil Conservation) 2009. Final Report. Comisión Europea de Agricultura y Desarrollo Rural. <<http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/projects/SOCO/>>
- Soil Survey Staff 1990. Keys to Soil Taxonomy (4th ed.). SMSS Technical monograph nº 6. Virginia, EEUU, 4-22.
- Solé Benet, A. 2006. Spain. En: Boardman, J. y Poesen, J. (Eds.), *Soil Erosion in Europe*. John Wiley & sons, England, 311-346.
- Souchère, V., King, D., Daroussin, J., Papy, F., 1998. Effect of tillage on runoff directions: consequences on runoff contributing area within agricultural catchments. *J. Hydrol.* 206, 256– 267.
- Spomer, R.G., Hjelmfelt, A.T., 1986. Concentrated flow erosion on conventional and conservation tilled watersheds. *Trans. ASAE* 29, 129– 147.
- Steegen A., Govers G., Takken I., Nachtergaele J., Poesen J., Merckx R. 2001. Factors controlling sediment and phosphorus export from two Belgian agricultural catchments. *Journal of Environmental Quality* 30 (4), 1249–1258.
- Stevens, C.J., Quinton, J.N., Bailey, A.P., Deasy, C., Silgram, M., Jackson, D.R., 2009. The effects of minimal tillage, contour cultivation and in-field vegetative barriers on soil erosion and phosphorus loss. *Soil Till. Res.* 106 (1), 145–151.
- Sumner, G., Ramis, C., Guijarro, J.A. 1993. The spatial organization of daily rainfall over Mallorca, Spain. *International Journal of Climatology* 13, 89 – 109.
- Sundquist, B. 2000. Top soil loss-causes. Effects and implications: a global perspective. 4th ed.
- Taboada Castro, M. T., Taboada Castro, M. M. y Rodríguez Blanco, M. L. 2010. Erosión hídrica en suelos agrícolas. En: Fra Paleo, U. (Coord.) *Riesgos naturales en Galicia: el encuentro entre naturaleza y sociedad*. Universidade de Santiago de Compostela, Servizo de Publicacións e Intercambio Científico: Consorcio de Compensación de Seguros (Madrid), 183-202.
- Takken, I., Govers, G., Steegen, A., Nachtergaele, N., Guérif, J. 2001a. The prediction of runoff flow directions on tilled fields. *Journal of Hydrology* 248, 1–13.
- Takken, I., Jetten, V., Govers, G., Nachtergaele, N., Steegen, A. 2001b. The effect of tillage-induced roughness on runoff and erosion patterns. *Geomorphology* 37, 1–14.
- Takken, I., Govers, G., Jetten, V., Nachtergaele, N., Steegen, A., Poesen, J. 2001c. Effects of tillage on runoff and erosion patterns. *Soil & Tillage Research* 61, 55-60.
- Tamés, C. 1957. Los grupos principales de suelos de la España Peninsular. Mapa agronómico nacional. Ministerio de Agricultura. Madrid.

- Thorne, C.R., Zevenbergen, L.W., Grissinger, E.H., Murphey, J.B. 1986. Ephemeral gullies as source of sediment. Proceedings of the Fourth Federal Interagency Sedimentation Conference, 1: 3-152, 3-161.
- Thornes, J.B. 1976. Semiarid erosional systems: case studies from Spain. London School of Economics, Geographical Papers. London. 79 páginas.
- Thorntwaite, C.W., 1948. An approach toward a rational classification of climate. Geogr. Rev. 38, 55-94.
- Torri, D., Regües, D., Pellegrini, S. y Bazzoffi, P. 1999. Within storm soil surface dynamics and erosive effects of rainstorms. Catena 38, 131-150.
- Toy, T.J. and Renard, K.G. 1998. "Introduction," in Guidelines for the Use of the Revised Universal Soil Loss Equation on Mined Lands, Construction Sites, and Reclaimed Lands, T.J. Toy and G.R. Foster (eds.), Office of Surface Mining, Reclamation, and Enforcement, U.S. Government Printing Office, 1-13.
- Troeh, F. R. y Thompson, L. M. 1993. Soils and soil fertility, 5ª ed. Oxford University Press. New York.
- Tropeano, D. 1984. Rate of soil erosion processes on vineyards in Central Piedmont (NW Italy). Earth Surface Processes and Landforms, 9, 253-266.
- Turc, L. 1961. Evaluation des besoins en eau d'irrigation: evapotranspiration potentielle. Ann. Agron. 12, 13-46.
- UNEP. 1992. World Atlas of desertification. United Nations Environment Programme.
- Unger, P.W., Stewart, B.A., Parr, J.F., Singh, R.P. 1991. Crop residue management and tillage methods for conserving soil and water in semiarid regions. Soil & Tillage Research 20, 219-240.
- USDA-SCS. 1992. Ephemeral Gully Erosion Model. EGEM. Version 2.0 DOS User Manual. Washington.
- USDA-ARS (2008a) Draft science documentation, Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2. <http://www.ars.usda.gov/sp2UserFiles/Place/64080510/RUSLE/RUSLE2_Science_Doc.pdf>
- USDA-ARS (2008b) Draft user's reference guide, Revised Universal Soil Loss Equation, Version 2. <http://www.ars.usda.gov/sp2UserFiles/Place/64080510/RUSLE/RUSLE2_User_Ref_guide.pdf>
- Valcárcel Armesto, M., Paz González, A., Dafonte, J. y Taboada Castro, M. T. 1999. Importancia de las prácticas agrícolas en el control de los procesos erosivos y evaluación mediante modelos de la incidencia de las mismas. En: Paz González, A. y Taboada Castro, M.T. (Eds.), Avances sobre el estudio de la erosión hídrica. Colección Cursos, Congresos e Simposios. Universidad de A Coruña, 7-41.
- Valdeolmillos Rodríguez, A. 2005. Registro paleoclimático y paleoambiental de los últimos 350.000 años en el Parque Nacional de las Tablas de Daimiel (Ciudad Real). Tesis Doctoral. Universidad de Alcalá de Henares.
- Valero-Garcés, B., Navas, A. Machín, J. y Walling, D. 1999. Sediment sources and siltation in mountain reservoirs: a case study from the Central Spanish Pyrenees, Geomorphology 28, 23-41.

- Van Doren, C.A., Stauffer, R.S., Kidder, E.H. 1950. Effect of contour farming on soil loss and runoff. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.* 15, 413-417.
- Van Reeuwijk, L.P. 1987. Procedures for soil analysis. International Soil References and Information Center.
- Vandaele, K., 1993. Assessment of factors affecting ephemeral gully erosion in cultivated catchments of the Belgian loam belt. In: Wicherek, S. (Ed.), *Farm Land Erosion in Temperate Plains Environment and Hills. Proceedings International Symposium on Farm Land Erosion*, May 1992, Saint-Cloud, France. Elsevier, Amsterdam, 125–136.
- Vandaele, K., Poesen, J., 1995. Spatial and temporal patterns of soil erosion rates in an agricultural catchment, central Belgium. *Catena* 25, 213–226.
- Vansteelant, J. Y., Trèvisan, D., Perron, L., Dorioz, J. M. y Roybin, L. 1997. Conditions d'apparition du ruissellement dans les cultures annuelles de la région lémanique. Relation avec le fonctionnement des exploitations agricoles. *Agronomie* 17, 65-82.
- Verheijen, F. G. A., Jones, R. G. A., Rickson, R. J. y Smith, C. J. 2008. Tolerable versus actual soil erosion rates in Europe. *Earth-Science Reviews* 94 (1-4), 23-38.
- Verstraeten G., Poesen J. 1999. The nature of small-scale flooding, muddy floods and retention pond sedimentation in central Belgium. *Geomorphology* 29 (3–4), 275–292.
- Verstraeten G., Poesen J. 2002. Using sediment deposits in small ponds to quantify sediment yield from small catchments: possibilities and limitations. *Earth Surface Processes and Landforms* 27 (13), 1425-1439.
- Verstraeten, G., Poesen, J., de Vente, J., Koninckx, X. 2003. Sediment yield variability in Spain: a quantitative and semiquantitative analysis using reservoir sedimentation rates. *Geomorphology* 50, 327–348.
- Viles, H.A. y Goudie, A.S. 2003. Interannual, decadal and multidecadal scale climatic variability and geomorphology. *Earth-Science Reviews* 61, 105–131.
- Walling, D.E., 1983. The sediment delivery problem. *J. Hydrology* 65, 209–237.
- Wang, L., Dalabay, N., Lu, P., Wu, F. 2017. Effects of tillage practices and slope on runoff and erosion of soil from the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall. *Soil & Tillage Research* 166, 147–156.
- Westoby M., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds M.J. 2012. Structure from Motion photogrammetry: a low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology* 179, 300–314.
- Wigley, T. M. L. 1985. Impact of Extreme Events. *Nature* 316, 106–107.
- Williams, J.R. y Berndt, H.D. 1977. Sediment yield prediction based on watershed hydrology. *Trans. Amer. Sot. Agr. Eng.* 20, 1100-1104.
- Wischmeier, W.H. 1976. Use and misarse of the Universal Soll Loss Equation. *J. of Soil and Water Cons.* 31(1): 5-9.
- Wischmeier, W.H. y Smith, D. D. 1978. Predicting Rainfall Erosion Losses. A guide to conservation planning. Agriculture Handbook N°. 537. USDA-SEA, US. Govt. Printing Office, Washington, DC.

- Woodward, D.E. 1999. Method to predict cropland ephemeral gully erosion. *Catena* 37, 393–399.
- Xie Zhiginf, Du Ying, Jian Aijun, Ding Yuguo. 2005. Climatic Trend of different intensity heavy precipitations events concentration in China. *Journal of Geographic Sciences* 15, 4.
- Young, A. 1998. Land resources: now and for the future. Cambridge, Cambridge University Press.
- Zalidis, G., Stamatiadis, S., Takavakoglou, V., Eskridge, K., Misopolinos, N. 2002. Impacts of agricultural practices on soil and water quality in the Mediterranean region and proposed assessment methodology. *Agric. Ecosyst. Environ.* 88, 137-146.

11. ANEXOS

Software Rill Morphometer

Programa para el análisis topográfico de las laderas y de las características de las redes de flujos concentrados estudiadas, así como para la cuantificación de las tasas de erosión producidas por el desarrollo de regueros y/o cárcavas efímeras y su evolución ladera abajo

El desarrollo informático *Rill Morphometer*, en adelante RM, cuya primera versión fue desarrollada en 2007 dentro del proyecto MANERO (influencia de los sistemas de manejo agrícola sobre los efectos erosivos de episodios extremos de lluvia) (ref. AGL2004-00650 del Plan Nacional de I+D+I 2004-07 (MEC) ha sido finalmente completado durante el desarrollo de esta Tesis.

La última versión de RM ha utilizado como soporte hojas de cálculo, en este caso del programa Excel®. En el programa se combinan: a) secuencias de instrucciones (Macros) que mediante comandos concretos son ejecutadas secuencialmente, y que han sido programadas a través del módulo de Visual Basic incluido en el propio Excel®; b) con el desarrollo de multitud de fórmulas de cálculo y gráficos sobre las propias hojas de cálculo del programa. El código fuente de los Macros tan sólo representa partes del código completo, ya que otra parte del código está implícito en la propia página Excel®, porque en las mismas se hacen cálculos y se actualizan datos. Por lo tanto, incluir aquí el código fuente de las Macros sería del todo insuficiente, por ello, se incluirán las hojas de Excel® completas, con todos los desarrollos elaborados.

El objetivo final es transformar de la forma más directa posible los datos de campo en los parámetros topográficos de las laderas estudiadas, así como conocer las características de los regueros. Igualmente, a través del programa se obtiene información de la evolución de la pérdida de suelo a lo largo de la ladera. Toda esta información se recoge en una tabla de salida, cuyas características se resumen en la tabla 1.

Tabla 1: Parámetros calculados por el programa Rill Morphometer para cada una de las redes de regueros estudiadas.

Parámetros	Símbolo en el programa	Unidades
Distancia	Dist	m
Cota	Z int	m
Pendiente	Pend.	%
Área de la franja delimitada por dos transectos	Area	m ²
Superficie aguas arriba	Sup.	m ²
Volumen de suelo perdido en una franja concreta	Vol.	m ³
Volumen acumulado de suelo perdido desde aguas arriba	V acum.	m ³
Tasa de erosión acumulada desde aguas arriba	Te	t ha ⁻¹
Número de canales presentes sobre una franja concreta	Nc	φ
Sección media de los canales dentro de una franja	Sección	m ²

Todo ello permite finalmente calcular los volúmenes totales de pérdida de suelo producida sobre una superficie, así como conocer las tasas de erosión, siempre conociendo la densidad aparente del suelo. Para todo ello, RM divide el perfil de la ladera en intervalos, mediante transectos de control -segmentos rectilíneos paralelos que intersectan perpendicularmente la red de regueros- (ver apartado 6.2). Los transectos son equidistantes bien en función de distancias oblicuas (en 3D), bien en función de diferencias de cota, según se determine (ver capítulo 6). Cabe recordar en este punto que a través de RM se ha determinado la precisión de cada uno de los métodos alternativos propuestos, basados en los transectos de control, respecto al Método de la Nube de Puntos. Por lo tanto, han sido desarrolladas diferentes versiones de RM que permiten trabajar a partir de los datos de campo obtenidos a partir de cualquiera de los cinco métodos de campo descritos en esta Tesis:

- Método de la Nube de Puntos (MNP)
- Método de los Transectos equidistantes según Distancias oblicuas considerando Longitudes equivalentes (MTD-Le).
- Método de los Transectos equidistantes según diferencias de Cota considerando Longitudes equivalentes (MTC-Le).
- Método de los Transectos equidistantes según Distancias oblicuas considerando Longitudes totales (MTD-Lt).
- Método de los Transectos equidistantes según diferencias de Cota considerando Longitudes totales (MTC-Lt).

Igualmente ha sido desarrollada una versión para trabajar con la información obtenida a partir de la aplicación de la fotogrametría, si bien, ya se ha comentado con anterioridad que este método ya se ha visto superado por nuevos desarrollos (fotogrametría moderna o fotogrametría automática (*Structure from Motion*, SfM)), la versión sigue siendo igualmente útil, independientemente del método con el que se obtengan las longitudes de las redes.

Para su funcionamiento, en cualquiera de sus versiones, el programa requiere como datos de partida el Modelo Digital del Terreno (MDT), el perfil longitudinal de la ladera y los datos de campo de las dimensiones de las distintas secciones transversales tomadas y sus localizaciones sobre la ladera, que se introducirán según un protocolo establecido.

Los archivos que han de ser confeccionados para el uso del programa son:

- a) MDT.txt: MDT de la microcuenca de estudio levantado a partir de los datos de los levantamientos topográficos. En este caso, los distintos MDTs fueron confeccionados utilizando el *software* informático *Surfer 10*®.
- b) Perfil.txt: Perfil topográfico longitudinal de la microcuenca desde el límite inferior de la microcuenca hasta su divisoria superior. Este archivo ha sido obtenido utilizando nuevamente *Surfer 10*®, a partir del MDT elaborado con anterioridad, si bien puede obtenerse con multitud de programas tipo GIS.
- c) Información relativa a las secciones de los regueros medidas en campo, que incluye: la posición en la ladera de cada una de las secciones del canal (coordenadas X, Y, Z) y la superficie (m²) de cada una de las secciones, si se ha utilizado en campo el MNP. En caso de haber utilizado un método de transectos, para cada transecto de medida se indica una única sección equivalente de canal. Ésta sección equivale a la superficie total de todas las secciones de los canales que son intersectadas por el transecto. De tal modo que se obtiene un único canal equivalente a la adición de todos los canales presentes en la microcuenca, independientemente de que luego se considere la longitud total de los regueros o se consideren longitudes equivalentes (ver apartado 6.3)

Rill Morphometer requiere además de una serie de datos complementarios. Son necesarios los valores de cota máxima y mínima de la microcuenca, valores de Z máxima y mínima del perfil, y la densidad aparente del suelo para poder elaborar los cálculos. Igualmente se puede determinar la equidistancia entre transectos (s) a la que se quieren realizar los cálculos.

Los archivos MDT.txt y Perfil.txt han de introducirse en una carpeta que habrá de crearse en C: y que se llamará regueros.

El archivo con las coordenadas de cada una de las secciones de los regueros ha de introducirse dentro de las propias hojas de Excel®, en la posición indicada para ello. Igualmente habrán de introducirse las coordenadas que definen el transecto inferior de la cuenca, que habrán sido tomadas en campo, si se ha utilizado el método de los transectos. Si el método hubiera sido el MNP, entonces este primer reguero se calculará con ArcGis o un software equivalente.

Una vez introducidos todos los datos necesarios de inicio, tanto en la propia hoja de Excel®, así como los archivos en la Carpeta regueros en C:, el Macro se corre en cinco pasos a través de cuatro comandos:

- a) Control+D: copia los datos del archivo perfil.txt en la hoja de cálculo.
- b) Control+R: Calcula la posición de los transectos, los cuales se expresan en forma de los parametros de la ecuación de la recta correspondiente.
- c) Control+S: Calcula los puntos exactos de corte de los transectos con la red de regueros y nos aporta la sección de los mismos.

Los pasos b y c resultan necesarios en caso de que se trabaje con datos obtenidos mediante el MNP en campo. Si se ha trabajado en campo con métodos de Transectos los valores que se obtienen de estos dos pasos ya se habrán obtenido directamente en campo y este paso puede obviarse acudiendo directamente al siguiente comando).

- d) Control+P: Calcula las distancias de la red.
- e) Control+L: De esta manera obtenemos la tabla con los resultados finales (ver tabla 1)

Existen pequeñas diferencias según las versiones de RM que vayan a utilizarse. El descrito con anterioridad es un procedimiento genérico de cálculo que varía ligeramente según el método aplicado. Junto a las cuatro diferentes versiones de RM que serán adjuntadas en un CD al trabajo, se incluirá un pequeño manual para su utilización, que detallará estas diferencias.

A continuación se incluyen algunas imágenes con las pantallas de las hojas de cálculo donde pueden observarse los resultados que ofrece el programa (figuras 1, 2 y 3).

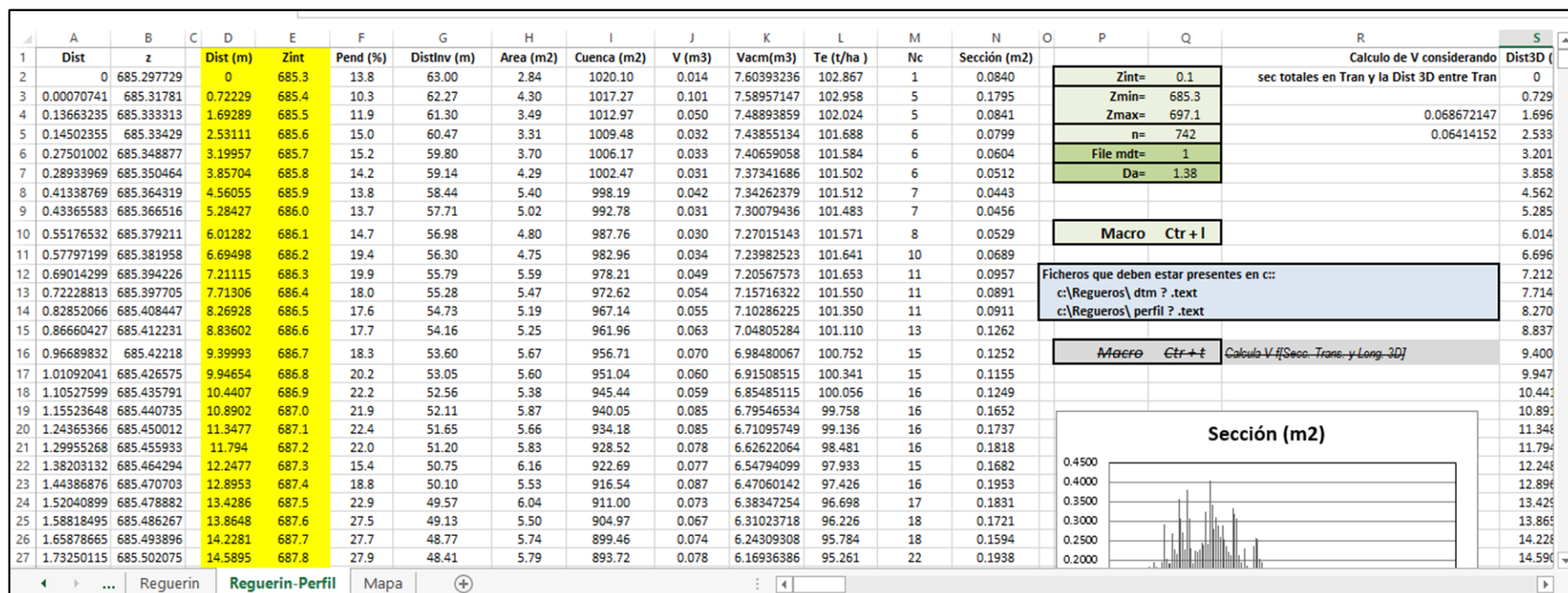


Figura 1: Parámetros calculados por el programa Rill Morphometer para cada una de las redes de regueros estudiadas (ver tabla 1). En este caso puede observarse que se han realizado los cálculos para equidistancias entre transectos de 0.1 m en cota

BT	BU	BV	BW	BX	BY
V = f[Dist 3D entre Trans]					
EquiDist	Vtot	% error	Dist.m	N Trans	Nsec
0.1	8.22	8.15	0.53	118	1837
0.2	8.04	5.67	1.07	60	924
0.3	8.21	7.93	1.58	41	614
0.4	7.75	1.91	2.08	31	463
0.5	8.22	8.11	2.58	26	375
0.6	8.42	10.79	3.08	22	312
0.7	8.05	5.82	3.57	19	261
0.8	7.75	1.91	4.08	17	230
0.9	7.80	2.59	4.73	15	206
1	8.64	13.57	5.07	14	190
1.1	8.25	8.53	5.57	13	167
1.2	9.03	18.80	6.05	12	159
1.3	8.66	13.88	6.84	11	147
1.4	8.22	8.15	7.14	11	136
1.5	8.47	11.38	7.52	10	125
1.6	8.58	12.83	8.16	10	112
1.7	8.99	18.29	8.48	9	107
1.8	8.59	12.94	9.08	9	113
1.9	8.79	15.66	9.76	9	102
2	8.37	10.05	9.93	8	82
2.1	7.80	2.60	10.53	8	76
2.2	7.92	4.19	11.15	8	77
2.3	9.18	20.74	11.87	8	78
2.4	9.92	30.51	11.77	7	75

Figura 2: Tabla auxiliar de Rill Morphometer. Se diseñó para poder comparar el método de referencia y el método alternativo considerado. En este caso esta tabla permite observar los cálculos de los volúmenes perdidos para diferentes equidistancias en cota (desde 0.1 m hasta 2.4 m) en la segunda columna; la tercera columna indica el error introducido respecto al método MNP de referencia, el cual ha sido considerado para el desarrollo del capítulo 6 de este trabajo pero que no resultará interesante en adelante; la cuarta columna indica la equidistancia media entre transectos en distancia oblicua para cada una de las equidistancias en cota consideradas; la quinta columna ofrece el número de transectos necesarios para poder llevar a cabo los cálculos para cada una de las equidistancias en cota; la sexta columna indica el número de secciones transversales calculadas con cada una de las equidistancias.

